

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

## **Diplomová práce**

2018

Bc. Aleš Zahradník

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

Měření a vyhodnocení jasů noční oblohy  
Measurement and evaluation of the night sky luminance

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Aleš Zahradník**  
Studijní program: N2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika  
Téma: **Měření a vyhodnocení jasů noční oblohy**  
**Measurement and evaluation of the night sky luminance**  
Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

- o Chování zrakového orgánu při nízkých úrovních jasů
- o Způsoby hodnocení rušivého světla
- o Světelné zdroje ovlivňující jasy noční oblohy
- o Sestavení měřicího řetězce pro vyhodnocování jasu noční oblohy
- o Měření a vyhodnocení jasů noční oblohy - návrh metodiky

### Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Sokanský, K.: Světelná technika. ČVUT, Praha 2011
- [2] Habel, J.: Světlo a osvětlování. FCC Public, Praha 2013
- [3] Sborníky z Kurzů osvětlovací techniky, Sborníky VŠB-TU, CIE
- [4] Manuály k výpočetním programům (Relux, Dialux, WILS)
- [5] [www.csorsostrava.cz](http://www.csorsostrava.cz)

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Karel Sokanský, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
děkan fakulty

# Prohlášení studenta

---

*„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“*

*Zahradník*

.....

## Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu práce prof. Ing. Karlu Sokanskému, Csc. a také doc. Ing. Tomáši Novákovi, Ph.D. za neocenitelnou pomoc a rady při realizaci, stejně jako za zapůjčení všech zařízení potřebných k měření. V neposlední řadě patří také poděkování Ing. Petru Běčákovi za konzultace a poskytnutí materiálů. Rád bych tímto také poděkoval svému spolužákovi Bc. Václavu Balwarovi za poskytnutí prostor k měření i za cenné rady při konstrukci soustavy.

# Abstrakt a klíčová slova

---

Tato práce se zabývá problematikou vyhodnocování jasů v podmínkách mezopického vidění. V teoretické části jsou stručně probrány základní problematiky rušivého světla, jeho kategorizaci i jeho zdroje. Dále je v práci nastíněno chování zrakového orgánu při mezopickém vidění a způsoby pro vyhodnocování rušivého světla. Praktická část obsahuje samotné měření a vyhodnocení, kdy je nejdříve popsán měřicí řetězec a jeho jednotlivé komponenty, a následně práce přechází v samotné provedení vyhodnocování naměřených jasových poměrů.

## Klíčová slova

Světelné znečištění; mezopické vidění; vyhodnocení jasů; EN 12464-2; LumiDISP; SIPS

## Abstract

This thesis is focused on evaluation of brightness in mesopic vision. In the theoretical part are briefly discussed problems of light pollution, its categorization and its sources. Furthermore, the behavior of the visual organ in mesopic vision and methods for evaluation of light pollution. In the practical part of the thesis is contained the measurement itself and evaluation, at first is described measuring chain and its components, and furthermore the thesis goes on to realisation of the measurement and evaluation.

## Key words

Light pollution; mesopic vision; evaluation of brightness; EN 12464-2; LumiDISP; SIPS

# Obsah

---

1	Úvod.....	1
2	Rušivé světlo .....	2
2.1	Zdroje znečištění .....	2
2.2	Konkrétní příklady zdrojů .....	3
2.3	Druhy znečištění.....	5
3	Chování zrakového orgánu při nízkých úrovních jasu.....	7
3.1	Spektrální křivky citlivosti .....	9
3.2	S/P Ratio.....	11
4	Způsoby hodnocení rušivého světla .....	12
4.1	Systém USP.....	12
4.2	Systém Move.....	13
4.3	Systém MES1 .....	15
4.4	Systém MES2.....	16
4.5	Porovnání systémů .....	17
4.6	Norma EN 12464-2 .....	18
5	Měřicí řetězec.....	21
5.1	Optika rybí oko .....	22
5.2	CCD čip.....	23
5.3	Kamera G2-4000.....	26
5.4	Rameno Celestron Nexstar.....	30
5.5	SIPS.....	32
5.6	LumiDISP .....	34
6	Měření a vyhodnocení jasů noční oblohy.....	35
7	Závěr .....	44
8	Literatura .....	45

# Seznam použitých symbolů a zkratek

---

K	kontrast jasů [-]
$L_0$	Jas pozorované hvězdy [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]
$L_b$	Jas pozadí [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]
ULR	celkový světlený tok vyzařovaný do horního poloprostoru (-)
ULOR	Přímo vyzářený světelný tok do horního poloprostoru (lm)
DLOR	Odražený světelný tok (lm)
$\lambda$	vlnová délka
$K_m$	maximální hodnota spektrálního průběhu veličiny K ( $\lambda$ )
$K'_m$	maximální hodnota spektrálního průběhu veličiny $K'(\lambda)$
$S_\lambda$	spektrální charakteristika světelného zdroje
$V(\lambda)$	poměrná spektrální citlivost zraku pro fotopické vidění
$V'(\lambda)$	poměrná spektrální citlivost zraku pro skotopické vidění
USP	United systém of photometry
X	koeficient charakterizující poměr fotopické a skotopické křivky
$L_p$	fotopický jas
$L_s$	skotopický jas
$M(x)$	normalizační funkce, upravující průběh maxima na hodnotu
E1	skutečně tmavé prostory jako národní parky a chráněná území
E2	oblasti s velmi malým jasnem jako průmyslové a obytné venkovní zóny
E3	středně světlé oblasti jako průmyslová a obytná předměstí
E4	velmi světlé oblasti jako městská centra a obchodní zóny
$E_v$	je největší hodnota svislé (vertikální) osvětlenosti na objektech v luxech
I	svítivost každého světelného zdroje v potenciálně rušivém směru



## 1 Úvod

Spolu s rostoucí zástavbou a rostoucí zalidněností úměrně stoupá i takzvaný světelný smog způsobený většinou venkovním osvětlením. Veřejné osvětlení je však nedílnou součástí tohoto světa, zajišťuje dostatečné podmínky pro práci, osvětlení komunikací stejně tak osvětlení architektonické, popřípadě reklamní. V práci je nastíněna problematika nejen světelného smogu, zakrývajícího výhled na noční oblohu, ale také energetická náročnost a dopady na životní prostředí. V práci je nastíněna kategorizace do jednotlivých zón podle světelného znečištění, tato sekce sice ještě není dodnes realizována, ale do budoucna bude tato kategorizace nutná. V současnosti je většina měření jasů prováděna za podmínek fotopického vidění, z tohoto důvodu byl pro potřeby realizovaného měření sestrojen optický filtr upravující spektrum na mesopické vidění. V práci je stručně popsána problematika světelného smogu, mesopického vidění, kategorizace zón, možných vyhodnocovacích systémů a chování lidského oka při mesopickém vidění. V praktické části je pak provedeno samotné sestavení měřícího řetězce a provedení měření s následným vyhodnocením.

## 2 Rušivé světlo

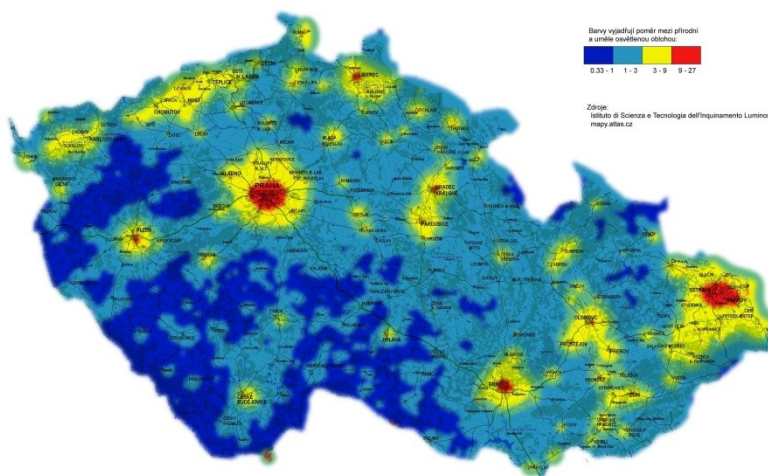
Neboli světelné znečištění je nadbytečné, špatně směřované nebo přímo nevhodné venkovní osvětlení. Platí, že čím větší město, tím více světelného znečištění z důvodu více světelných zdrojů. Tohle přebytečné světlo omezuje výhled na oblohu a tím i poškozuje astronomický výzkum. Dále narušuje ekosystémy, hlavně u živočichů, kterým narušuje jejich denní / noční cyklus. Ovlivňuje i zdraví lidí tím, že narušuje spánek při vniknutí okny. Úměrně světelnému znečištění roste i zbytečná spotřeba energie.

Světelné znečištění je doslovným překladem z anglického light pollution, avšak tento název je nepřesný. Název znečištění by odpovídal trvalému zanesení nežádoucími částicemi, v našem případě znečištění zmizí okamžitě po odstranění příčiny, tedy vypnutí zdrojů tohoto znečištění.

### 2.1 Zdroje znečištění

Světelné znečištění pochází pouze od zařízení stvořené člověkem, neexistuje žádný přírodní ekvivalent, který by dosáhl srovnatelného efektu. Hlavními zdroji jsou myšleny následující kategorie.

- Nedostatečné plánování – Nevhodné, nebo nadbytečné umístění veřejného osvětlení a osvětlených reklamních ploch. Mohou způsobit oslnění a světelný přesah.
- Nezodpovědné používání – Sem patří už dříve zmíněné reklamní plochy, ale také sezónní osvětlení, jako třeba vánoční výzdoba. Také sem lze zařadit nedostatečné řízení intenzity osvětlení, nebo možnost úplného vypnutí na místech, kde se v noci nepohybují lidé, například na noc zamykaných parků, osvětlení zavřených obchodních center atd.
- Přelidněné oblasti – Vysoká koncentrace záření z obytných prostor, veřejného osvětlení atd.
- 



Obr.1. Světelné znečištění v ČR (7)

Umělé světelné zdroje značně ztěžují pozorování těles na noční obloze, okem i profesionálním dalekohledem. Ztížené podmínky způsobuje i samotný vliv atmosféry, její vliv je však

proměnný v závislosti na čase, a lidmi neovlivnitelný. Zdroje, které září do horního poloprostoru přímo, nebo i odrazem zvyšují závojevý jas oblohy. Světlo vyzařené ze země do atmosféry podléhá rozptylu při kontaktu s částicemi v atmosféře a vrací se zpět, tvoří tím tedy závojevý jas. Pozorovateli se zvýší jas celé pozorované plochy (oblohy) a tím se zmenší kontrast mezi tělesy na noční obloze a jejich pozadím. Po zmenšení kontrastu se značně zhorší schopnost vesmírná tělesa pozorovat, s velmi nízkým kontrastem zanikne jejich viditelnost úplně. (1)

Daný kontrast lze definovat jako:

$$K = \frac{L_0 - L_b}{L_b} \quad (1)$$

K – kontrast jasů [-]

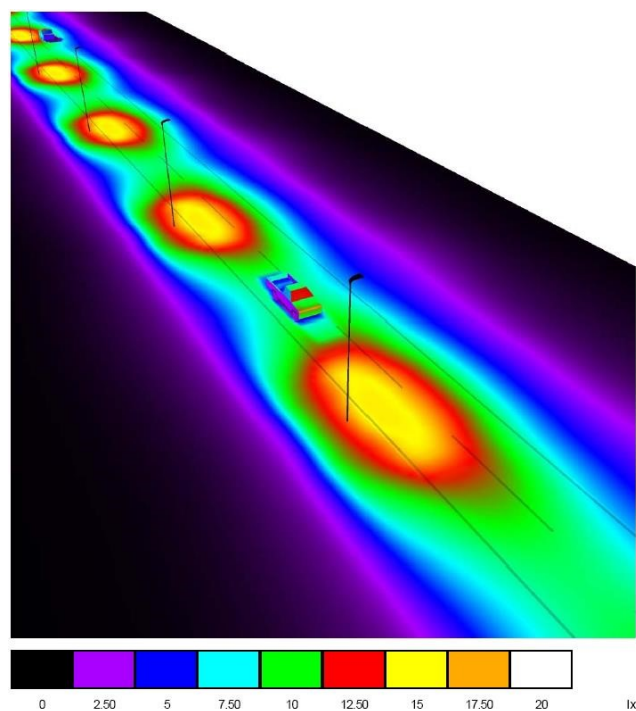
$L_0$  – Jas pozorované hvězdy [ $\text{cd/m}^2$ ]

$L_b$  – Jas pozadí [ $\text{cd/m}^2$ ] (1)

## 2.2 Konkrétní příklady zdrojů

### Osvětlení pozemních komunikací

Jeden z nejdůležitějších zdrojů rušivého světla. Myšleno osvětlení silnic, chodníků, nádraží autobusových i vlakových atd. Pro omezení rušivého světla je třeba vhodně navrhnout danou soustavu osvětlení, to znamená zvolit vhodné rozmístění světelných zdrojů, přizpůsobit intenzitu a vzdálenost, aby se zamezilo zbytečnému plýtvání a zbytečně nepředimenzovávat. Dále je třeba zvolit vhodné svítidlo, které by mělo způsobovat minimální oslnění a mělo by co nejméně vyzařovat do horního poloprostoru. Toho docílíme zvolením svítidla s nejvhodnější vyzařovací charakteristikou.



*Obr.2. Příklad osvětlení pozemní komunikace (8)*

### **Osvětlené reklamní plochy**

Rušivé světlo je v tomto případě generováno svítidly, které mají za úkol osvětlit plochu, a co nejvíce upoutat pozornost pozorovatele. Proto bývají tyto reklamní plochy osvětleny s nepřiměřeně velkou intenzitou a tím se podílejí nemalou měrou na rušivém světle. Jedná se hlavně o billboardy, reklamní cedule, ukazatele směru lákající do obchodů, osvětlení obchodních center atd.



*Obr.3. Příklad osvětlení obchodního domu (9)*

## **Osvětlení domácností**

Vyzařované světlo domácnostmi je ovlivněno mnoha faktory, například závěsy, žaluziemi a polohou svítidla v místnosti. Svítidlo je většinou nad hranicí okna a proto vyzařování do horního poloprostoru nehraje tolik významnou roli, jedná se zpravidla o odražený světelný tok.

## **Osvětlení průmyslových zón**

Pro velké podniky s rozlehlými výrobními halami, mezi kterými je třeba v rámci vykonávání práce přesouvat materiál i osoby v nočním provozu, je třeba zajistit dostatečné osvětlení, aby nedošlo k úrazu. Tento požadavek je přímo v rozporu s minimalizováním rušivého světla, ale v rámci bezpečnosti je nepoměrně důležitější. Jedná se tedy často o hustou síť výkonných svítidel, které lze korigovat hlavně vhodnou vyzařovací charakteristikou.

## **2.3 Druhy znečištění**

Je mnoho druhů rušivého světla a liší se od sebe charakterem i zdrojem. Můžeme chápat znečištění jako viditelné rušivé vlivy nebo světelný závoj kolem měst. Můžeme jej dělit do těchto pěti kategorií:

- Nadbytečné osvětlení
- Oslňující světlo
- Podíl horního světla ULR
- Záře oblohy
- Světelný přesah

### **Nadbytečné osvětlení**

Je to přítomnost světla intenzivnějšího, než je vyžadováno pro dané místo nebo danou činnost. Způsobuje zbytečnou ztrátu elektrické energie, poškozuje zdraví a způsobuje oslnění. Toto znečištění může být zredukováno pohybovými čidly, které budou zapínat osvětlení jen v případě potřeby (kancelářské prostory, chodby, příjezdové cesty atd.), maximální využití denního světla za dne, tedy instalování světlíků a vhodnou polohou oken a snížením intenzity osvětlení, kde není přílišná intenzita vyžadována.

### **Oslňující světlo**

Vzniká vlivem veřejného osvětlení, osvětlených reklamních ploch i odrazem z okolních ploch. Vniká do obytných prostor a narušuje spánek hlavně v nižších patrech. Nevhodně navržené osvětlení komunikací může oslňovat chodce na chodnících, ale i řidiče na silnicích a způsobit tak dopravní nehodu.

### Podíl horního světla ULR

Je to podíl světelného toku vyzařeného do horního poloprostoru k celkovému toku vyzařovanému ze svítidla. Celkový světelný tok vyzařený do horního poloprostoru je tvořen součtem přímo vyzařeného toku do horního poloprostoru ULOR a odraženého světelného toku DLOR.

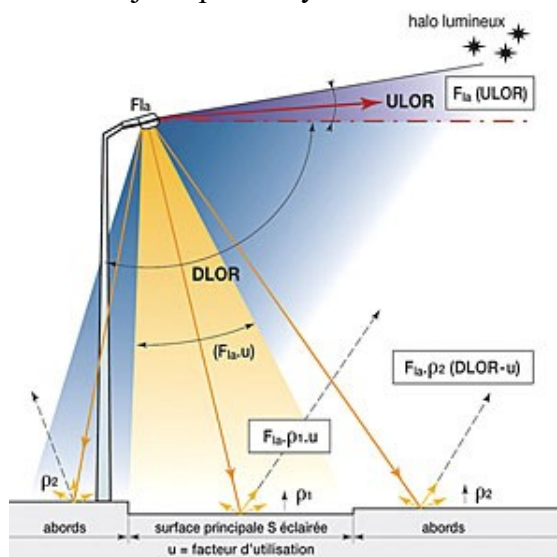
$$ULR = \frac{ULOR}{ULOR + DLOR} \quad (2)$$

ULR – celkový světelný tok vyzařovaný do horního poloprostoru (-)

ULOR – Přímý vyzařený světelný tok do horního poloprostoru (lm)

DLOR – Odražený světelný tok (lm)

ULOR i DLOR uvádí výrobce v katalogových listech, hodnota ULR je značně ovlivněna odrazností povrchů, proto se uvádějí do příslušných tříd.



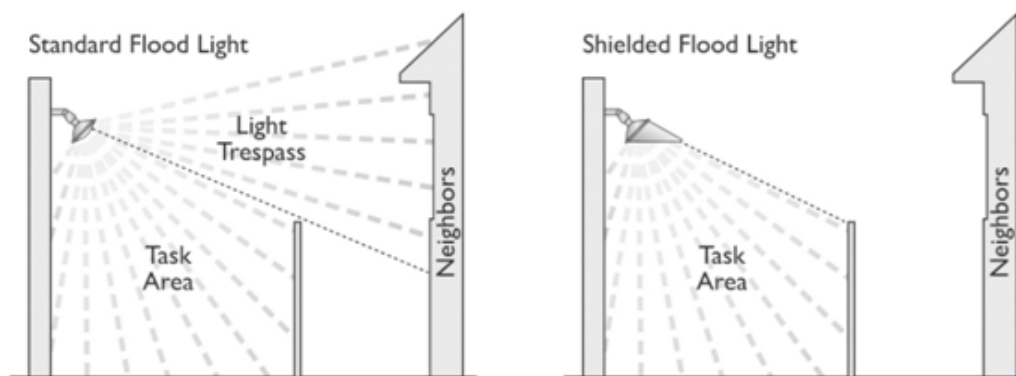
Obr. 4. Znázornění principu ULR (10)

### Záře Oblohy

Záře oblohy je myšlen světelný smog obklopující města. Je způsoben vyzařováním veřejným osvětlením, reklamami, domácnostmi, letišti atd., které se pak šíří atmosférou. Velkou měrou je záře oblohy ovlivněna chemickým složením atmosféry, tedy podíl vodních par, prachových částic a aerosolů. Tyto prvky světelný tok z části odrážejí, pohlcují a propouští. Z těchto vlastností je nejdůležitější odrazení světelného toku, odražený světelný tok se dostává k pozorovateli, nebo je dále odražen od ostatních povrchů. Vlivem kaskády odrazů a rozptylů pak vzniká záře oblohy. Díky tomu se ztrácí kontrast mezi objekty na obloze a oblohou, čímž je značně ztíženo jejich pozorování. Netýká se to jen lidského oka, ale i kamery a snímače jsou postiženy tímto parazitním jasnem.

## Světelný přesah

Je to nežádoucí světlo, které dopadá mimo svůj vymezený prostor, například do domácností, nebo na cizí pozemky. Hlavní zdroje jsou mimo jiné i svítidla veřejného osvětlení a osvětlené reklamní plochy. V mnoha případech může takový přesah narušovat soukromí i zdraví, kdy například bezpečnostní osvětlení pozemku míří přímo do oken sousedství apod. Potlačení světelného přesahu lze docílit například použitím clony, nebo nasměrováním svítidla.



Obr.5. Rozdíl nasvícení mezi světelným přesahem a správným osvětlením (11)

## 3 Chování zrakového orgánu při nízkých úrovních jasu

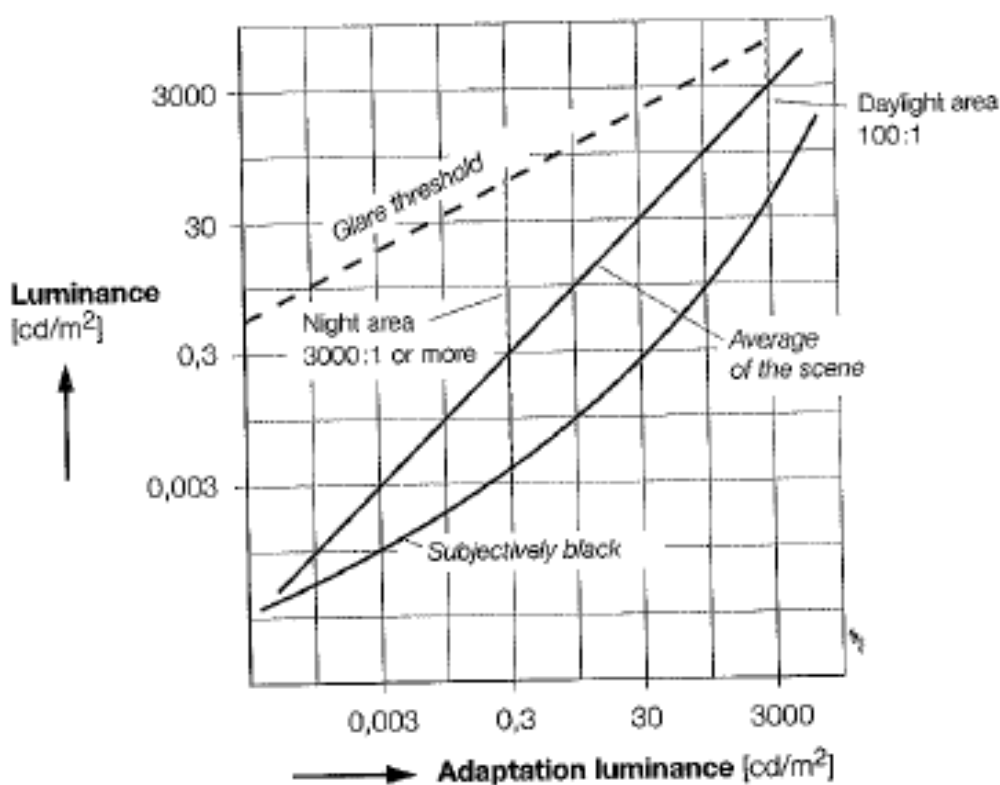
V noci při sníženém jasu můžeme mluvit o skotopickém (nočním) vidění a mezopickém (soumračném) vidění. První případ je zajištěn očními receptory zvané tyčinky a druhý kombinací tyčinek a čípků (receptory denního vidění). V našem případě však bude použito jen mezopické vidění, protože místa vyhodnocování rušivého světla jsou už ze své podstaty uměle osvětleny. (3)

Optické elementy oka promítají optický obraz okolního prostředí na sítnici. Optické elementy oka jsou: rohovka, oční čočka, duhovka s otvorem zvaným zřítelnice. První krok k vytvoření optického obrazu provede rohovka, ta tvoří vnější část oka a zároveň je hlavním refrakčním činitelem. Refrakce je poměr úhlné lomivosti všech lomných prostředí oka k délce oční koule. Čočky upravují ohniskovou vzdálenost optického systému, tento proces umožňuje zaostření na různé vzdálenosti. S přibývajícím věkem čočky ztrácejí svou flexibilitu, proto je ve stáří časté zhoršení zaostřování na krátkou vzdálenost. (2)

Pro mezopické vidění oko musí upravit svoji citlivost pro okolní jas. Tento proces se nazývá adaptace oka a je tvořen těmito třemi aspekty:

- Změna průměru zřítelnice. Čím je průměr větší, tím více světla projde do oka, což je u mezopického vidění žádoucí.
- Adaptace citlivosti receptorů. Dosaženo chemickými změnami vizuálního pigmentu a změnami elektrického chování receptorů.
- Vypínání a zapínání receptorů. Důležité pro skotopické a fotopické vidění, při mezopickém jsou ale aktivní čípky i receptory.

Adaptace je dynamický proces přechodu z jednoho stavu do druhého. Při funkci všech tří procesů oko dosahuje velmi velkého rozsahu citlivosti. Spodní hranice vizuálního vnímání, při které je oko schopno rozeznat rozdíl od absolutní tmy je  $10^{-6}$  cd/m<sup>2</sup>. Horní hranice, při které je oko schopno rozeznat použitelný obraz se blíží absolutnímu oslnění, a její hodnota je  $10^4$  cd/m<sup>2</sup>. Samotné oko je schopno zpracovat i vyšší hodnoty, ale oslnění brání získání použitelného obrazu. (2)



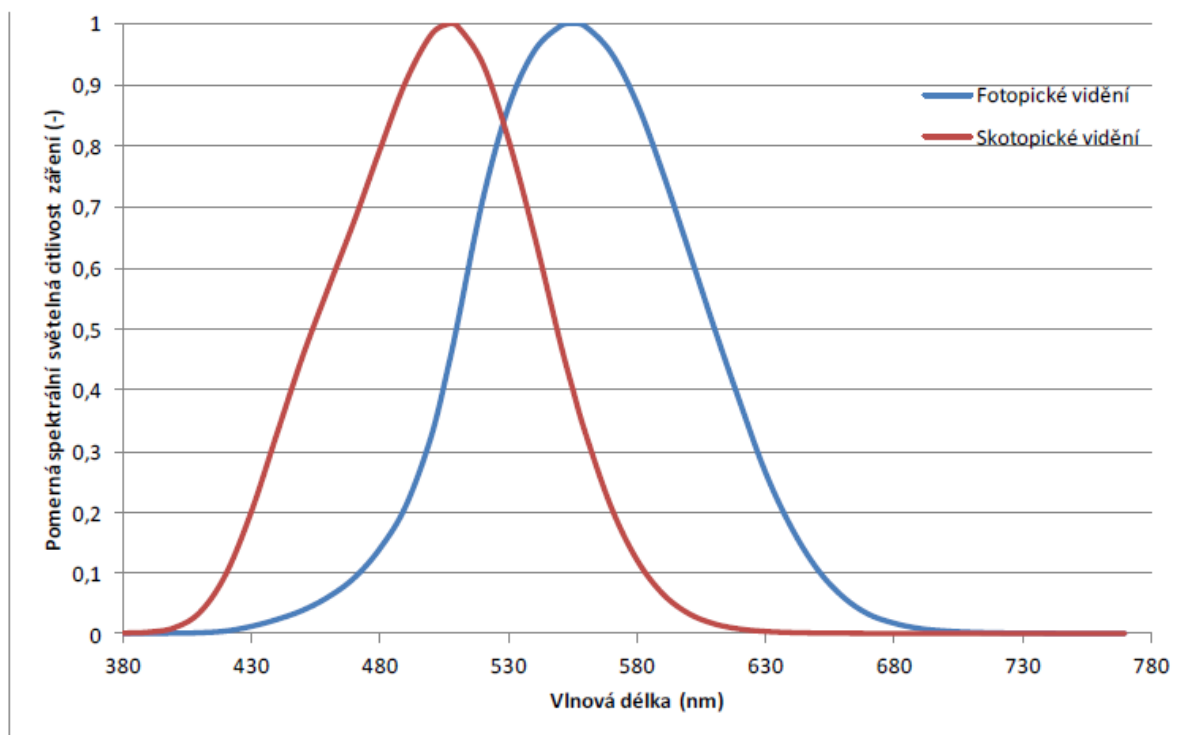
Obr.6. Znáznornění průběhu adaptace oka v závislosti na jas (2)



Neexistuje žádná hodnota jasu, které by se skotopické a fotopické vidění setkaly. Mezi jejich křivkami je široké pásmo, které se nazývá oblast mezopického vidění. Jeho existence je dána tím, že čípky ani tyčinky nejsou vypínány / zapínány, ale že pracují souběžně. Předpokládá se, že tyčinky a čípky pracují pořád, jen ne vždy je jejich činnost patrná. Hranice mezopického vidění není přesně definována, protože nelze určit kde mezopické vidění přechází do skotopického nebo fotopického. Různé zdroje uvádějí různé hodnoty ve snaze definovat tuto hranici. Nejčastěji je však uváděna hodnota horní hranice mezopického vidění jako  $3 \text{ cd/m}^2$  a spodní hranice jako  $0,01 \text{ cd/m}^2$ . (2)

### 3.1 Spektrální křivky citlivosti

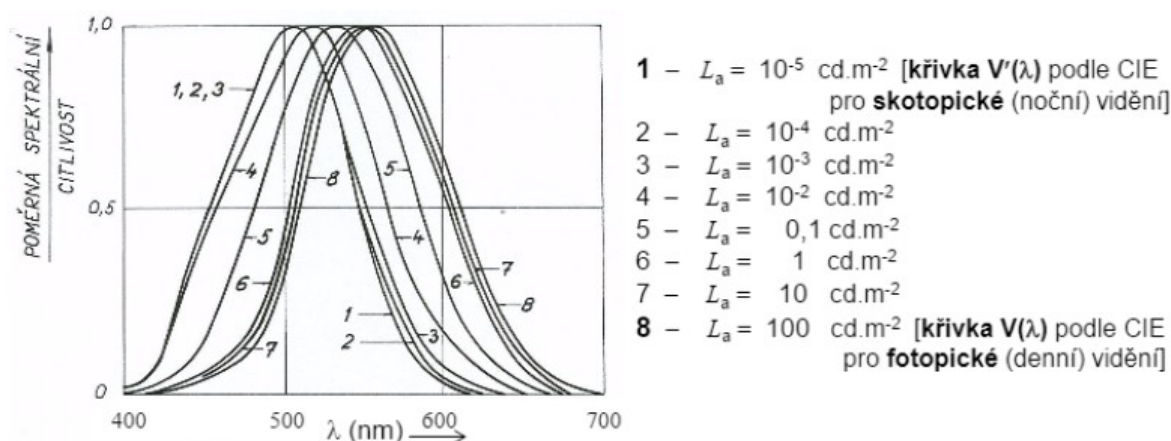
Spektrální křivky jsou udávány v poměrných hodnotách vztažených k maximální absolutní hodnotě citlivosti. Pro fotopické vidění je maximum při vlnové délce  $\lambda = 555 \text{ nm}$ , u skotopického vidění je pak maximum při hodnotě  $\lambda = 507 \text{ nm}$ . Mezi těmito křivkami pak leží mezopické vidění. (4) Magnetické pole kolem vybuzené elektrickým proudem vodiče má tvar soustředných kružnic. Pokud se nachází více vodičů v blízkosti, dochází k součtu vektorů intenzity (závisí na orientaci vektorů).



Obr. 7. Poměrná spektrální citlivost fotopického a skotopického vidění (4)

Při fotopickém vidění dosahuje obraz mnohem větší ostrosti. Ve skotopickém vidění není možno rozeznávat barvy. Při mezopickém vidění se podílí oba druhy receptorů a jejich poměr je závislý na míře přijímaného jasu, proto čím víc se blížíme skotopickému vidění, tím více barvy zanikají. Rychlost adaptace je mnohem rychlejší u fotopického vidění, než u skotopického. Přesto, že mají křivky podobný tvar, jejich maxima se liší ve svých vlnových délkách, to způsobuje, že skotopické vidění je citlivější na modré světlo, méně pak na červené a žluté. V praxi to pak vypadá, že v noci modrý objekt bude vypadat bíle a červený zase černě.

(2)



Obr.8. Poměrné křivky spektrální citlivosti pro různé adaptační jasy (5)

Lidské oko se dokáže přizpůsobit na všechny hodnoty jasů ležící mezi fotopickým a skotopickým (1) viděním. Mezopické vidění v tomto případě reprezentují křivky 2-7, samotné mezopické vidění ale leží kdekoli mezi nimi. Pro sjednocení světelně technických výpočtů přijala mezinárodní komise pro osvětlování (CIE) dohodu o hodnotách spektrální citlivosti, ta přesně definuje křivky pro fotopické a skotopické vidění. Z uvedených průběhů vyplývá, že spektrální citlivost oka není v mezopickém vidění konstantní, ale je závislá na adaptačním jasu okolí. S klesajícím jasnem začnou převládat tyčinky nad čípky a tím klesá schopnost rozpoznávat barvy a získávat ostrý obraz. (5)

### 3.2 S/P Ratio

Česky poměr S/P, je důležitý faktor u mezopického vidění, protože udává poměr fotopického a skotopického vidění. Tím určuje poměr čípků a tyčinek podílejících se na výsledném obrazu. Určuje také jas světelného zdroje, vyšší poměr S/P znamená vyšší jas světelného zdroje. Může nastat případ, kdy světelný zdroj s vyšším poměrem S/P ale s nízkým příkonem bude pro pozorovatele vykazovat vyšší jas než světelný zdroj s vyšším příkonem, ale s menším poměrem S/P. Kvůli rozdílným křivkám spektrální světelné účinnosti bude mít jeden zdroj různé hodnoty zářivého toku pro skotopické a fotopické vidění. Měření těchto veličin probíhá použitím spektrometru nebo luxmetru kdy je v jednom měření kalibrován na skotopické vidění a ve druhém na fotopické vidění.(5)

$$\frac{S}{P} = \frac{K'_m \int_0^\infty S_\lambda(\lambda) \cdot V'(\lambda) \cdot d\lambda}{K_m \int_0^\infty S_\lambda(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (3)$$

$\lambda$  – vlnová délka

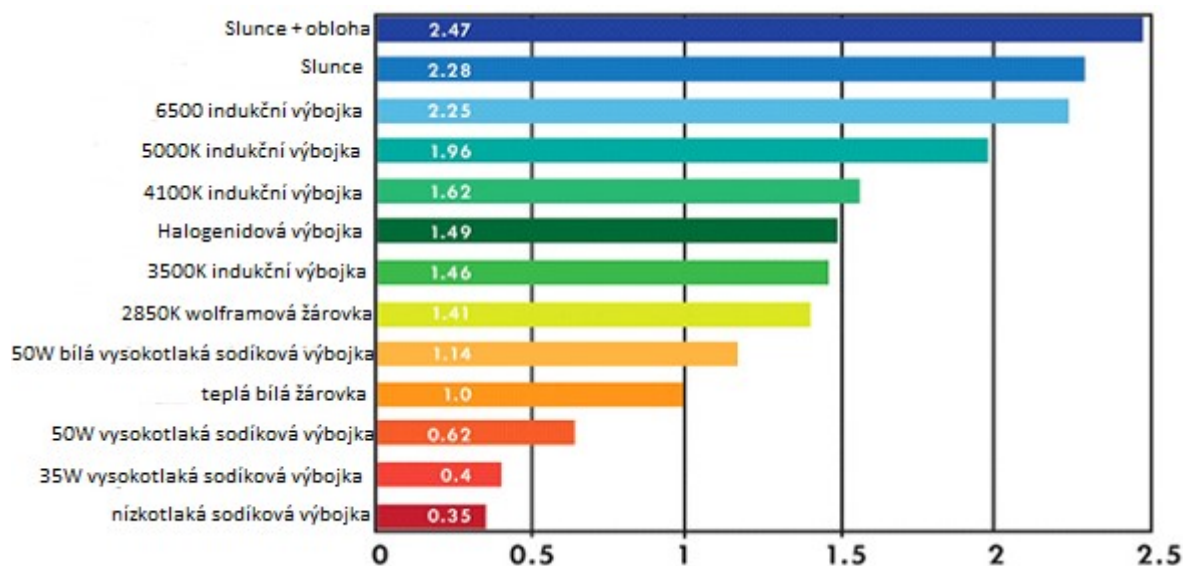
$K_m$  – maximální hodnota spektrálního průběhu veličiny  $K(\lambda)$ , 683 lm/W

$K'_m$  – maximální hodnota spektrálního průběhu veličiny  $K'(\lambda)$ , 1700 lm/W

$S_\lambda$  – spektrální charakteristika světelného zdroje

$V(\lambda)$  – poměrná spektrální citlivost zraku pro fotopické vidění

$V'(\lambda)$  – poměrná spektrální citlivost zraku pro skotopické vidění (5)



Obr.9. Příklady S/P poměru pro různé světelné zdroje (6)

## 4 Způsoby hodnocení rušivého světla

Vzhledem k tomu, že je práce věnovaná měření jasů noční oblohy, bude zde rozebrány způsoby hodnocení pouze mezopického světla pomocí tzv. mezopických systémů. Oproti fotopického a skotopického vidění nelze mluvit o předem daných křivkách citlivosti, ale je třeba průběh popsat funkcí. Vzniklo několik systémů, které mezopické vidění popisují na základě praktických měření. Tyto systémy sdružuje ve svých dokumentech CIE, mezinárodní organizace pro osvětlování. CIE doporučuje jako nejvhodnější metodu MES2. (5)

### 4.1 Systém USP

USP, neboli United systém of photometry, byl první systém pro matematický popis mezopického vidění. USP pracuje na základě měření času reakce monokulárního pozorovatele, kde k osvětlení pozorovaného předmětu byly použité dva různé světelné zdroje a to vysokotlaká sodíková výbojka a halogenidová výbojka. Pracuje v rozsahu  $0,001 \text{ cd/m}^2$  do  $0,6 \text{ cd/m}^2$ . (5)

$$V_{mez}(\lambda) = XV(\lambda) + (1 - X)V'(\lambda) \quad (4)$$

$V(\lambda)$  – poměrná fotopická spektrální citlivost zraku normálního fotometrického pozorovatele

$V'(\lambda)$  – poměrná skotopická spektrální citlivost zraku normálního fotometrického pozorovatele

$X$  – koeficient charakterizující poměr fotopické a skotopické křivky (5)

$$X = \frac{1}{0,599} L_{mez} - \frac{0,001}{0,599} \quad (5)$$

Pro  $0 \leq X \leq 1$

Pro tento systém byla dovozena rovnice pro výpočet mezopického jasu:

$$L_{mez} = 0,834L_p - 0,335L_s - 0,2 + \sqrt{0,696L_p^2 - 0,333L_p - 0,56L_pL_s + 0,113L_s^2 + 0,537L_s + 0,4} \quad (6)$$

$L_p$  fotopický jas

$L_s$  skotopický jas (5)

## 4.2 Systém Move

Move, neboli mesopic optimisation of visual efficiency, je systém který vznikl ve spolupráce několika vysokých škol. Díky tomu se provádělo několik měření na odlišných místech, a tím se minimalizovala chyba měření. Cílem tohoto systému bylo popsat mezopické vidění při řízení auta v nočních hodinách. Pracuje se třemi základními otázkami:

(5)

- Může to být vidět?

Závisí hlavně na kontrastu jasu pozorovaného objektu vůči jasu okolí.

- Jak rychle?

Jinak také reakční doba. Rozdíl mezi začátkem podnětu a odezvy na rozeznání podnětu.

- Co to je?

Identifikace objektu včetně detailů.

Měření se zúčastnilo celkově 109 pozorovatelů, systém pracuje v rozsahu  $0,01\text{cd/m}^2$  do  $10\text{cd/m}^2$

Křivka citlivosti je definována funkcí:

$$V_{mez}(\lambda) = \frac{xV(\lambda) + (1-x)V'(\lambda)}{M(x)} \quad (7)$$

$V(\lambda)$  - poměrná fotopická spektrální citlivost zraku pro normálního fotometrického pozorovatele

$V'(\lambda)$  – poměrná skotopická spektrální citlivost zraku pro normálního fotometrického pozorovatele

$X$  – koeficient závislý na úrovni jasu a spektru

$M(x)$  – normalizační funkce, upravující průběh maxima na hodnotu 1. (5)

Koeficient  $x$  se získává iteračním výpočtem a nabývá hodnot 0-1:

$$x_{n+1} = a + b \cdot \log_{10} \left[ \frac{1}{M(x_n)} \left( x_n \frac{L_p}{K_m} + (1 - x_n) \frac{L_s}{K'_m} \right) \right] \quad (8)$$

$a - 1,49$

$b - 0,282$

$L_p$  - fotopický jas ( $\text{cd/m}^2$ )

$L_s$  – skotopický jas ( $\text{cd/m}^2$ )

$K_m$  – maximální hodnota spektrálního průběhu veličiny  $V(\lambda)$  ( $K_m = 683 \text{ lm/W}$ )

$K'_m$  – maximální hodnota spektrálního průběhu veličiny  $V'(\lambda)$  ( $K'_m = 1699 \text{ lm/W}$ ) (4)

Rovnice pro výpočet mezopického jasu od  $0,01 \text{ cd/m}^2$  do  $10 \text{ cd/m}^2$ :

$$L_{mez} = \frac{x \cdot L_p + (1 - x) \cdot L_s V'(\lambda_0)}{x + (1 - x) V'(\lambda_0)} \quad (9)$$

$V'(\lambda_0) = 683/1699$

$\lambda_0 = 555 \text{ nm}$

$L_{mez}$  - mezopický jas ( $\text{cd/m}^2$ )

$L_p$  – fotopický jas ( $\text{cd/m}^2$ )

$L_s$  – skotopický jas ( $\text{cd/m}^2$ ) (4)

Normalizovaná funkce  $M(x)$  je dána:

$$M(x) = \max[x \cdot V(\lambda) + (1 - x) V'(\lambda)] \quad (10)$$

$X$  – koeficient závislý na adaptačních podmínkách v rozmezí 0-1

$V(\lambda)$  – poměrná spektrální světelná citlivost fotopického záření

$V'(\lambda)$  – poměrná spektrální světelná citlivost skotopického záření (4)

### 4.3 Systém MES1

Jelikož systém USP má horní hranici příliš nízkou ( $0,6 \text{ cd/m}^2$ ) a systém MOVE příliš vysokou ( $10 \text{ cd/m}^2$ ), vznikl systém MES1, který poskytuje dostatečnou použitelnost. Systém MES1 má dolní hranici jasu  $0,01 \text{ cd/m}^2$  a horní hranici  $3 \text{ cd/m}^2$ . Systém MES1 je popsán rovnicí následovně:

$$M(m_1) \cdot V_{mes}(\lambda) = m_1 \cdot V(\lambda) + (1 - m_1) \cdot V'(\lambda) \quad (11)$$

$M(m_1)$  – normalizovaná funkce upravující průběh maxima. Kde  $V_{mes}(\lambda) = 1$

$V_{mes}(\lambda)$  – poměrná spektrální světelná citlivost mezopického záření (-)

$M_1$  – koeficient závislý na adaptačních podmínkách (-)

Pro  $L_{mes} \geq 3 \text{ cd / m}^2$ , pak je  $m_1 = 1$

$L_{mes} \leq 0,01 \text{ cd / m}^2$ , pak je  $m_1 = 0$

$0,01 \text{ cd / m}^2 \leq L_{mes} \leq 3 \text{ cd / m}^2$ , pak je  $m_1 = 0,404 \cdot \log(L_{mes}) + 0,807$

$V(\lambda)$  – poměrná spektrální světelná citlivost fotopického záření (-)

$V'(\lambda)$  – poměrná spektrální světelná citlivost skotopického záření (-) (4)

K výpočtu mezopického jasu  $L_{mes}$  a koeficientu  $m_1$  je použita rovnice:

$$L_{mes,n} = \frac{m_{1,(n-1)} \cdot L_P + (1 - m_{1,(n-1)})L_S \cdot V'(\lambda_0)}{m_{1,(n-1)} + (1 - m_{1,(n-1)})V'(\lambda_0)} \quad (12)$$

$$m_{1,n} = a + b \cdot \log_{10}(L_{mes,n}) \text{ pro } 0 \leq m_{1,n} \leq 1 \quad (13)$$

$$V'(\lambda_0) = 683 / 1699$$

$$\lambda_0 = 555 \text{ nm}$$

$$a = 0,807$$

$$b = 0,404$$

$n$  – počet iteračních kroků (-)

$L_P$  – fotopický jas ( $\text{cd / m}^2$ )

$L_S$  – skotopický jas ( $\text{cd} / \text{m}^2$ ) (4)

#### 4.4 Systém MES2

Systém, který má spodní hranici  $0,005 \text{ cd} / \text{m}^2$  a horní hranici  $5 \text{ cd} / \text{m}^2$ . Systém MES2 je vyjádřen následující rovnicí:

$$M(m_2) \cdot V_{mes}(\lambda) = m_2 \cdot V(\lambda) + (1 - m_2) \cdot V'(\lambda) \quad (14)$$

$M(m_2)$  – normalizovaná funkce upravující průběh maxima, kde  $V_{mes}(\lambda) = 1$

$V_{mes}(\lambda)$  – poměrná spektrální světelná citlivost mezopického záření (-)

$m_2$  – koeficient závislý na adaptačních podmínkách (-)

Pro  $L_{mes} \geq 5 \text{ cd} / \text{m}^2$ , pak je  $m_1 = 1$

$L_{mes} \leq 0,005 \text{ cd} / \text{m}^2$ , pak je  $m_1 = 0$

$0,005 \text{ cd} / \text{m}^2 \leq L_{mes} \leq 5 \text{ cd} / \text{m}^2$ , pak je  $m_1 = 0,333 \cdot \log(L_{mes}) + 0,767$

$V(\lambda)$  – poměrná spektrální světelná citlivost fotopického záření (-)

$V'(\lambda)$  – poměrná spektrální světelná citlivost skotopického záření (-) (4)

K výpočtu mezopického jasu  $L_{mes}$  a koeficientu  $m_2$  je použita rovnice:

$$L_{mes,n} = \frac{m_{2,(n-1)} \cdot L_P + (1 - m_{2,(n-1)})L_S \cdot V'(\lambda_0)}{m_{2,(n-1)} + (1 - m_{2,(n-1)})V'(\lambda_0)} \quad (15)$$

$$m_{2,n} = a + b \cdot \log_{10}(L_{mes,n}) \text{ pro } 0 \leq m_{2,n} \leq 1 \quad (16)$$

$$V'(\lambda_0) = 683 / 1699$$

$$\lambda_0 = 555 \text{ nm}$$

$$a = 0,767$$

$$b = 0,333$$



$n$  – počet iteračních kroků (-)

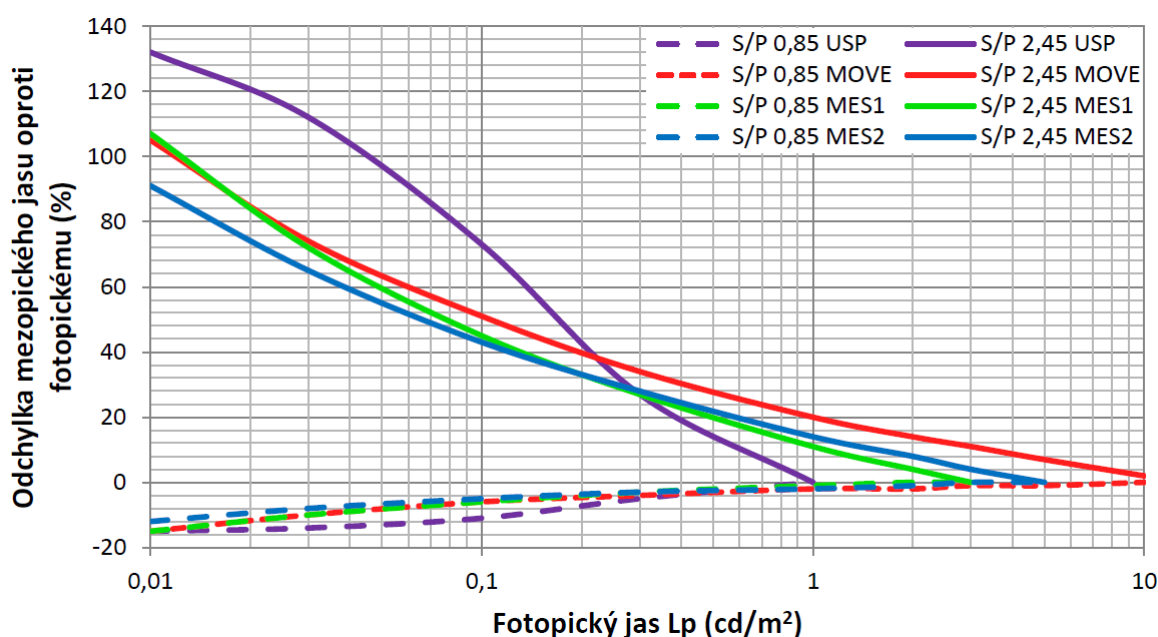
$L_P$  – fotonický jas ( $\text{cd} / \text{m}^2$ )

$L_S$  – skotopický jas ( $\text{cd} / \text{m}^2$ ) (4)

#### 4.5 Porovnání systémů

Hlavní nevýhody USP systému jsou jednoduchost matematického popisu, který právě kvůli své jednoduchosti podává zkreslená data, má také poměrně malý mezopický rozsah jasů a to od  $0,001 \text{ cd} / \text{m}^2$  do  $0,6 \text{ cd} / \text{m}^2$ . Systém MOVE je omezený svým zaměřením na problematiku vidění u řízení auta při snížené viditelnosti. Rozsah jasů systému MOVE je  $0,01 \text{ cd} / \text{m}^2$  pro spodní hranici a  $10 \text{ cd} / \text{m}^2$  pro horní hranici. Horní hranice  $10 \text{ cd} / \text{m}^2$ , ta je však příliš vysoká. Pro výše zmíněné nedostatky vydala mezinárodní komise CIE dva nové systémy MES1 a MES2, které eliminují chyby obou dříve zmíněných systémů. (5)

Systémy MES1 a MES2 jsou téměř totožné, liší se jen svými koeficienty použitými při výpočtu a rozsahem adaptačních jasů v mezopickém vidění.



Obr.10. Srovnání mezopických systémů pro zdroje s poměrem  $S/P$  2,45 a 0,85 (5)

Na Obr. 10 je graficky znázorněné srovnání jednotlivých systémů. Průběhům pro  $S/P=2,45$  odpovídá LED studená bílá. Pro  $S/P=0,85$  zase vysokotlaká sodíková výbojce. Z průběhů je patrné, že systém USP dosahuje největších odchylek v obou hodnotách  $S/P$ , i když u  $S/P$  2,45 podstatně výrazněji. Nejpresnější systém je MES2.

## 4.6 Norma EN 12464-2

Předmětem této normy je stanovení požadavků pro venkovní pracovní prostory z hlediska zrakové pohody a zrakového výkonu. Aby lidé mohli vykonávat zrakové úkony účinně a přesně, zvláště v noční době, musí jim být poskytnuto vhodné osvětlení. Úroveň viditelnosti a pohody požadovaná pro velké množství pracovních prostorů závisí na druhu a době trvání činnosti. Tato norma specifikuje požadavky na osvětlovací soustavy pro většinu pracovních a přilehlých prostorů z hlediska intenzity a jakosti osvětlení. K tomu jsou doplněna doporučení pro správnou osvětlovací praxi. Požadavky na osvětlení v této evropské normě nejsou stanoveny z hlediska bezpečnosti a zdraví pracovníků při práci a norma nebyla připravena na základě uplatnění článku 137 smlouvy ES, ačkoliv požadavky na osvětlení uvedené v této normě zpravidla splňují bezpečnostní požadavky. Požadavky na osvětlení z hlediska bezpečnosti a zdraví pracovníků při práci mohou být obsaženy ve směrnících založených na článku 137 smlouvy ES, v národní legislativě členských států přejímajících tyto směrnice nebo v jiné národní legislativě členských států. (12)

Pro ochranu a zlepšení nočního prostředí je nutné kontrolovat rušivé světlo (známé také jako světelné znečištění), které může představovat fyziologické a ekologické problémy pro prostředí a osoby. Limity rušivého světla ve venkovních osvětlovacích soustavách k minimalizaci problémů pro osoby, floru a faunu jsou uvedeny v tabulce. (12)

**Tab. 1. Přípustné maximum rušivého světla ve venkovních osvětlovacích soustavách (12)**

Zóna (charakteristika) prostředí	Světlo na objektech		Svítivost svítidla		Světlo nahoru	Jas	
	E <sub>v</sub> lx		I cd		ULR %	L <sub>b</sub> cd / m <sup>2</sup>	L <sub>a</sub> Cd / m <sup>2</sup>
	Mimo noční klid <sup>a)</sup>	V době nočního klidu	Mimo noční klid	V době nočního klidu		Fasády budov	značky
E1	2	0	2500	0	0	0	50
E2	5	1	7500	500	5	5	400
E3	10	2	10000	1000	15	10	800
E4	25	5	25000	2500	25	25	1000
<sup>a)</sup> V případě kdy se neuplatňuje noční omezení, větší hodnoty nesmí být překročeny a menším hodnotám se má dát přednost							

Poznámky k tabulce

E1 – představuje skutečně tmavé prostory jako národní parky a chráněná území

E2 – představuje oblasti s velmi malým jasnem jako průmyslové a obytné venkovní zóny

E3 – představuje středně světlé oblasti jako průmyslová a obytná předměstí

E4 – představuje velmi světlé oblasti jako městská centra a obchodní zóny

E<sub>v</sub> – je největší hodnota svislé (vertikální) osvětlenosti na objektech v luxech

I – svítivost každého světelného zdroje v potenciálně rušivém směru

ULR – podíl (poměrná část) světelného toku svítidla (svítidel) vyzařovaného nad horizont v jeho (jejich) pracovní poloze a umístění

L<sub>b</sub> – největší průměrný jas fasády budovy v cd / m<sup>2</sup>

L<sub>a</sub> – největší průměrný jas značek v cd / m<sup>2</sup> (12)

**Tab.2. Největší hodnoty prahového přírůstku od jiných než uličních svítidel (12)**

Světelnotechnické parametry	Třída osvětlení pozemní komunikace <sup>a)</sup>			
	Osvětlení jiné než uliční	ME5	ME4 / ME3	ME2 / ME1
Prahový přírůstek (TI) <sup>b)c)</sup>	15% za předpokladu, že adaptační jas je 0,1 cd / m <sup>2</sup>	15% za předpokladu, že adaptační jas je 1 cd / m <sup>2</sup>	15% za předpokladu, že adaptační jas je 2 cd / m <sup>2</sup>	15% za předpokladu, že adaptační jas je 5 cd / m <sup>2</sup>
<sup>a)</sup> Třídy osvětlení podle EN 13201-2				
<sup>b)</sup> Výpočet TI podle EN 13201-3				
<sup>c)</sup> Tyto limity se použijí v případě, že uživatelé dopravního systému jsou vystaveni omezení viditelnosti základních informací. Hodnoty platí pro relevantní polohu a pro směr pohledu na trasu dopravy				

V současné době ještě neexistuje databáze rozřazení lokalit do environmentálních zón, takže nelze určit do jaké environmentální zóny (E1-E4) spadá místo s měřicím stanovištěm. Rozřazení do environmentálních zón je prováděno v zásadě podle druhu a četnosti zástavby v daných lokalitách. Kategorizace je ovlivněna zejména přímým vyzařováním do horního poloprostoru, nezávisle na době noční klidu.

### **Příklady environmentálních zón:**

#### **Zóna E1**

- Observatoře a její okolí do jednoho kilometru
- Nezastavěné okolí vesnic
- Národní parky a chráněné krajinné oblasti a jejich okolí do jednoho kilometru

#### **Zóna E2**

- Rozvodné stanice
- Zastavěné části vesnic mimo odlehlé části a jejich okolí do jednoho kilometru
- Nezastavěné okolí měst

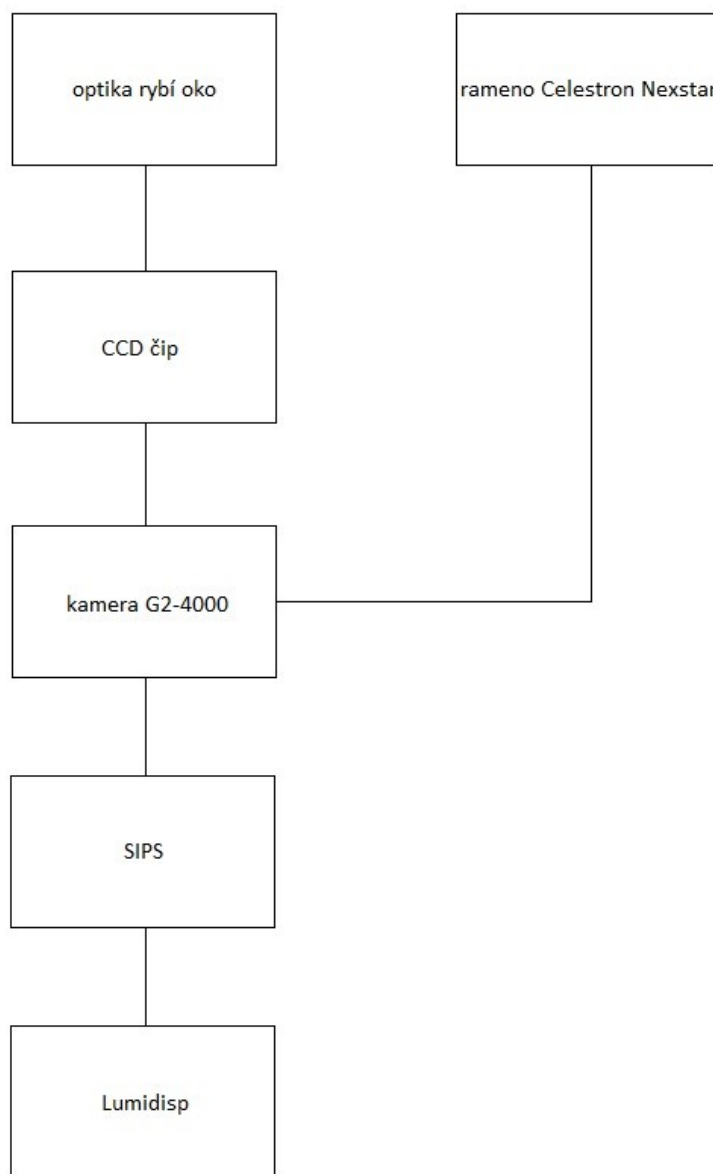
#### **Zóna E3**

- Zastavěné části města a jejich okolí do jednoho kilometru

#### **Zóna E4**

- Centrum města s poloměrem minimálně jednoho kilometru
- Průmyslová oblast a nákupní oblast s poloměrem minimálně jednoho kilometru

## 5 Měřicí řetězec



Obr.11. Měřicí řetězec navrhovaného měření

Měření je prováděno pomocí kamery G2-4000 s CCD čipem Kodak KAI-4022, na které je nasazená optika rybí oko. Použitím této optiky docílíme širokého zorného pole, které sahá až k horizontu, to nám umožňuje sledovat celou noční oblohu viditelnou z místa měření. Kamera je upevněná na pohyblivé rameno Celestron Nexstar, které má kompenzovat pohyb země ve dvou osách, tím pádem je docíleno statického obrazu, namísto putujících hvězd při dlouhých expozicích. Rameno je ovládáno pomocí vlastního ovládání situovaného na panelu v zadní části otočné hlavy. Rameno je nutné před samotným měřením nastavit a zacílit pro správnou funkci

sledování vybraných bodů na obloze. Kamera je řízená počítačem skrze softwarový program SIPS. Kameru je možno ovládat pomocí různých programů, podle doporučení výrobce byl ale zvolen právě SIPS pro svoji úplnou kompatibilitu. V programu SIPS lze přímo dané fotografie upravovat, lze vybírat konkrétní jasové spektrum na histogramu, udělat jasovou mapu, invertovat barvy atd.. Samotný program ale neumožňuje hlubší jasovou analýzu a neposkytuje číselné informace o jasu na pořízených fotografiích, proto se fotografie pořízené v programu SIPS zpracují v programu LumiDISP, který už danou analýzu umožňuje.

### 5.1 Optika rybí oko

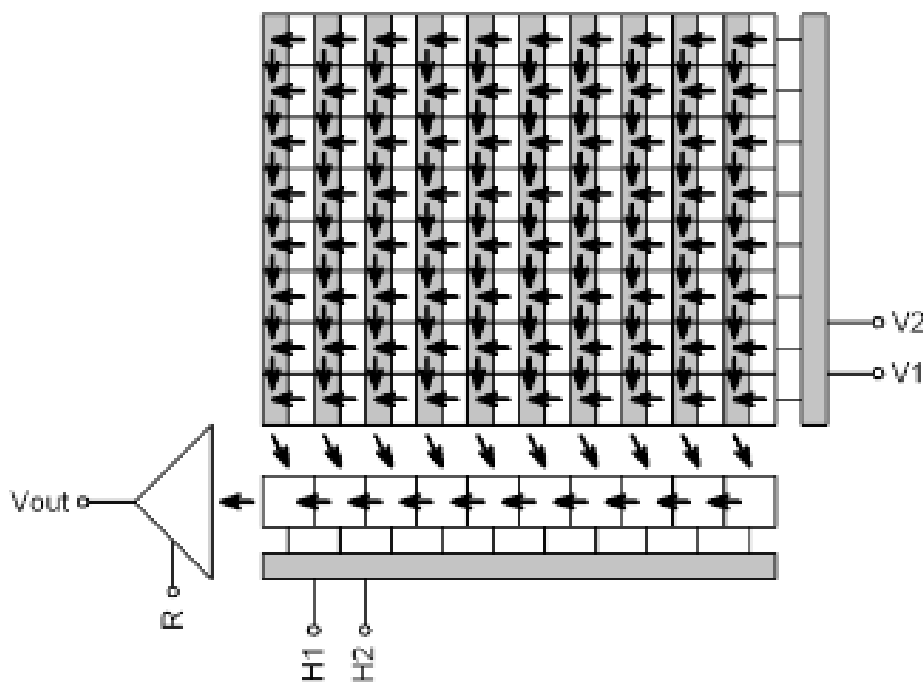
Rybí oko je typ širokoúhlého objektivu, jehož čočka má záběr s velmi širokým úhlem a velkým soudkovým zkreslením. Objektiv rybí oko je schopno zobrazit úhel až o 180°. Tento typ objektivu byl původně vyvinut pro využití v meteorologii pro studium oblak. Rybí oko se pak stalo velmi populární také v dalších oblastech fotografie pro svůj unikátně zkreslený záběr. Pro měření noční oblohy je tento objektiv ideální, protože zorné pole dokáže obsáhnout oblohou celou včetně horizontu.



*Obr.12. Objektiv rybí oko (14)*

## 5.2 CCD čip

Kamery G2-4000 se vyrábějí s detektory 4MPx CCD Kodak KAI-4022 s takzvanou IT (Interline Transfer) architekturou. Na ploše CCD čipů s touto architekturou je vždy vedle sloupce pixelů zachycujících světlo sloupec zastíněný, označovaný jako vertikální registr. Na konci expozice stačí jediným impulsem přenést náboj naakumulovaný v pixelech do vertikálních registrů. Poté je náboj již obdobně jako v případě FF (Full Frame) detektorů přenášén z vertikálních registrů do horizontálního registru a digitalizován. Tento mechanismus je také označován jako „elektronická závěrka“, neboť dovoluje pořizování velmi krátkých expozic a také dovoluje vyčítání snímku bez zastínění čipu mechanickou závěrkou. I kamery G2 s těmito CCD detektory jsou vybaveny mechanickou závěrkou, protože elektronická závěrka například nedovoluje pořízení temných snímků, potřebných pro kalibraci obrazu. Za elektronickou závěrku platí IT detektory nižší kvantovou účinností ve srovnání s FF čipy. Zpravidla jsou také všechny IT detektory vybaveny ABG a dovolují tedy snímat i velmi jasné objekty bez přetoků náboje do vedlejších pixelů. (13)



Obr.13. Schéma CCD IT čipu (13)

Specifikace čipu:

Model - KAI-4022

Rozlišení - 2056 x 2062

Velikost pixelu - 7,4 x 7,4  $\mu\text{m}$

Rozměry čipu - 15,2 x 15,2 mm

ABG - ano

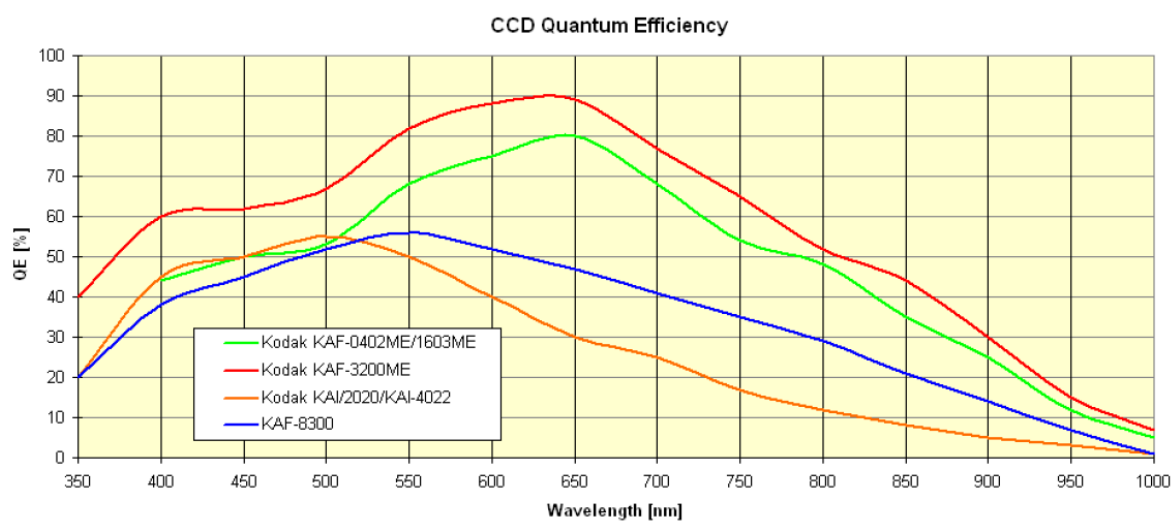
Barevný čip - neobsahuje

Plná kapacita pixelu - přibližně 40 000 e-

Plná kapacita výstupu - přibližně 100 000 e-

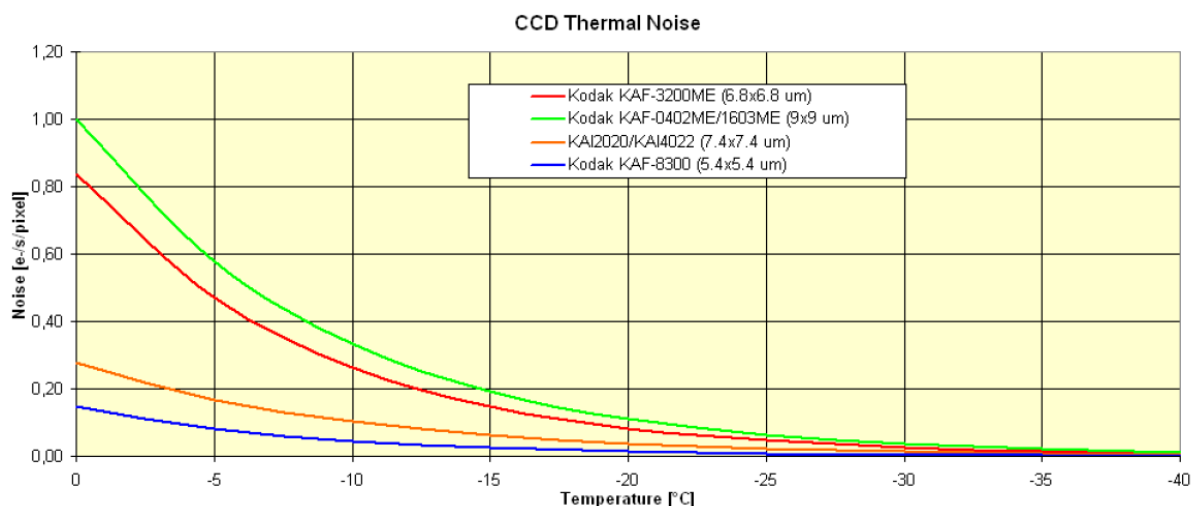
Temný proud - 0,3 e- / s / pixel při 0°C

Zdvojení temného proudu - 7°C (13)



Obr.14. Kvantová účinnost CCD čipu (13)





Obr.15. Průběhy Temných proudů u CCD čipů (13)

## Chlazení

Regulované dvoustupňové termoelektrické chlazení dokáže ochladit CCD čip až o 50 $^{\circ}C$  pod okolní teplotu. Horká strana Peltiérových článků je chlazená ventilátorem. Teplota CCD čipu je regulována s přesností  $\pm 0,1^{\circ}C$ . Účinné chlazení minimalizuje vlastní temný proud CCD čipu a přesná regulace teploty dovoluje správnou kalibraci pořízených snímků. Hlava kamery obsahuje dva tepelné senzory – první měří přímo teplotu CCD čipu, druhý senzor měří teplotu vzduchu chladícího horkou stranu Peltiérových článků. Výkon chlazení závisí na okolních podmínkách a také na kvalitě napájení. Pokud napájecí napětí klesne pod 12V, maximální tepelný rozdíl se zmenší. Ventilátory pracují nepřetržitě, protože jsou rovněž využívány k chlazení napájecích zdrojů kamery. (13)

Maximální rozdíl teplot mezi CCD čipem a okolním vzduchem může přesáhnout 50 $^{\circ}C$ , pokud chlazení pracuje na 100% výkonu. Nicméně v takovém případě nemůže být teplota čipu účinně regulována, protože kamera nemá prostor k zesílení chlazení, pokud okolní teplota vzroste. Teplotní rozdíl 45 $^{\circ}C$  může být dosažen s chlazením pracujícím přibližně na 85% výkonu, což zaručuje dostatečný prostor k regulaci. (13)

### 5.3 Kamera G2-4000

Kamery G2-4000 CCD jsou vyvíjeny pro zobrazování v podmínkách extrémně slabého osvětlení v astronomii, mikroskopii apod. Kamery jsou navrhovány k práci spolu s osobním počítačem. Na rozdíl od digitálních fotoaparátů, které pracují na počítači nezávisle, vědecké chlazené CCD kamery vyžadují počítač pro řízení, nahrávání obrázků, jejich zpracování a ukládání apod. K práci s kamerami G2 CCD je zapotřebí počítač, který je kompatibilní se standardem PC, pracuje s 32 bitovým operačním systémem Windows, obsahuje alespoň jeden USB 2.0 port. Kamera potřebuje k práci externí napájecí zdroj. Není možné provozovat kameru z napájení poskytovaného USB připojením. Kamera G2-4000 CCD obsahuje velmi efektivní chlazení čipu CCD čipu, mechanickou závěrku a filtrové kolo, takže jejich spotřeba přesahuje možnosti USB napájení. Na druhé straně samostatné napájení zbavuje uživatele problémů s úbytkem napětí na příliš dlouhých USB kabelech, s rychlým vybíjením baterií přenosných počítačů apod. Kamera musí být připojena k optickému systému, například dalekohledu, aby mohla snímat obraz. Kamera je navrhována pro dlouhé expozice, nezbytné k zachycení velmi slabých objektů. Pokud je kamera použita s dalekohledem, je nezbytné, aby dalekohled na montáži dokázal hladce sledovat objekt během celé expozice. (13)

#### Elektronika kamery

Rozlišení ADC	- 16 bitů
Vzorkování	- korelované dvojité vzorkování
Čtecí módy	- standartní - nízkošumový
Vodorovný binning	- 1 až 4 pixely
Svislý binning	- 1 až 4 pixely
Čtení podoblastí	- libovolná podoblast
Čtení v TDI módu	- neobsahuje
Rozhraní	- USB 2.0 high speed (13)

16 bitový A/D převodník s korelovaným dvojitým vzorkováním zajišťuje vysoký dynamický rozsah a čtecí šum na úrovni samotného CCD čipu. Rychlé USB rozhraní dovoluje stažení snímku během několika sekund. Maximální délka USB kabelu je 5m. Tato délka může být prodloužena na 10m použitím USB rozbočovače nebo aktivního USB prodlužovacího kabelu. V rámci jednoho připojení může být použito až 5 rozbočovačů nebo aktivních prodlužovacích kabelů. Některé aktivní prodlužovací prvky USB dodávané třetími stranami dovolují přenášet USB komunikaci až na vzdálenost 100m. (13)

## Napájecí zdroj

Možnost napájení neregulovaným stejnosměrným napětím 12 V dovoluje kameře G2-4000 CCD pracovat z jakýchkoliv zdrojů, včetně baterií, síťových adaptérů apod. S kamerou je přibalen univerzální síťový adaptér 100-240 V AC/50-60Hz, 60 W. Ačkoliv spotřeba kamery nepřesahuje 30W, maximální výkon 60 W u zdroje dodávaného s kamerou zajišťuje stabilitu napájení a minimální rušení. Kamera obsahuje vlastní napájecí zdroje pro elektroniku, takže může být napájena z neregulovaného zdroje 12 V DC, vstupní napětí může být mezi 10 – 14 V. Nicméně některé parametry se mohou při nižším napětí zhoršit, jako například efektivita chlazení. Napájecí napětí je též možno sledovat z ovládacího software programu, u SIPS je zobrazeno v záložce „cooling“ (13)

## Mechanické specifikace

Hlava G2-4000 CCD kamery obsahuje USB-B port a port pro napájení 12 V DC. Obsahuje též mechanickou závěrku, která umožňuje pořizování expozic bez rozmazání, stejně jako automatické pořizování temných snímků. Dále obsahuje integrované filtrové kolo s pěti pozicemi pro standardní 1,25 palcové filtry v objímkách se závitem. Případně lze standardní pětímístné filtrové kolo vyměnit za šestímístné pro stejné filtry bez objímek.

Interní mechanická závěrka - clonková závěrka

Nejkratší expoziční doba - 0,05 s

Nejdelší expoziční doba - Limitována pouze saturací čipu

Interní filtrové kolo - 5 pozic pro 1,25 palcové objímky se závitem

- 6 pozic pro 26,5 mm skleněné filtry

Velikost hlavy - 114 x 114 x 77 mm

Vzdálenost ohniskové roviny - 29 mm

Hmotnost hlavy - 1,1 kg

### **Přizpůsobení spektrální světelné citlivosti pomocí filtru**

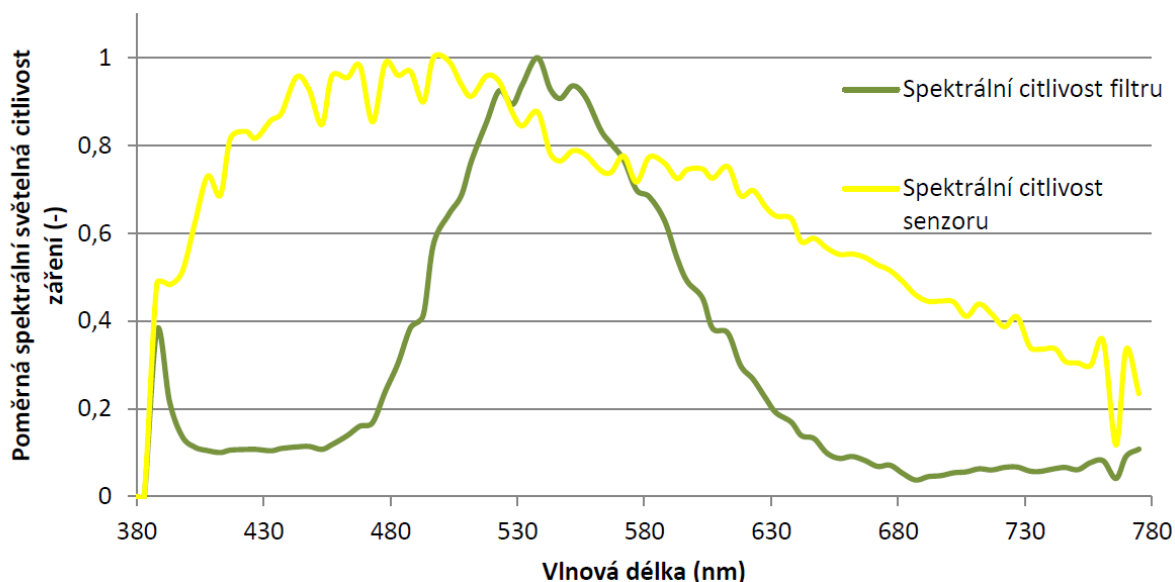
Kamera G2-4000 CCD pracuje s vyměnitelnými filtry usazenými ve filtrovém kole. Kamera dokáže pořídit pouze jeden snímek v daném čase, proto pokud chceme na expozici použít filtrů více je třeba focení opakovat pro každý filtr zvlášť. Kamera G2-4000 CCD neumožňuje focení barevných fotek, to ale neznamená, že nejdou vytvořit. Pro vytvoření takové barevné fotky je třeba pořídit 3 identické fotografie, každá s jiným filtrem. Těmito filtry jsou myšleny filtry pro R, G a B, neboli červenou složku, zelenou složku a modrou složku. Po uložení těchto tří fotek lze tyto fotky skombinovat a vytvořit tím barevný obraz.



*Obr.16. Filtrové kolo spolu s elektronikou kamery (13)*

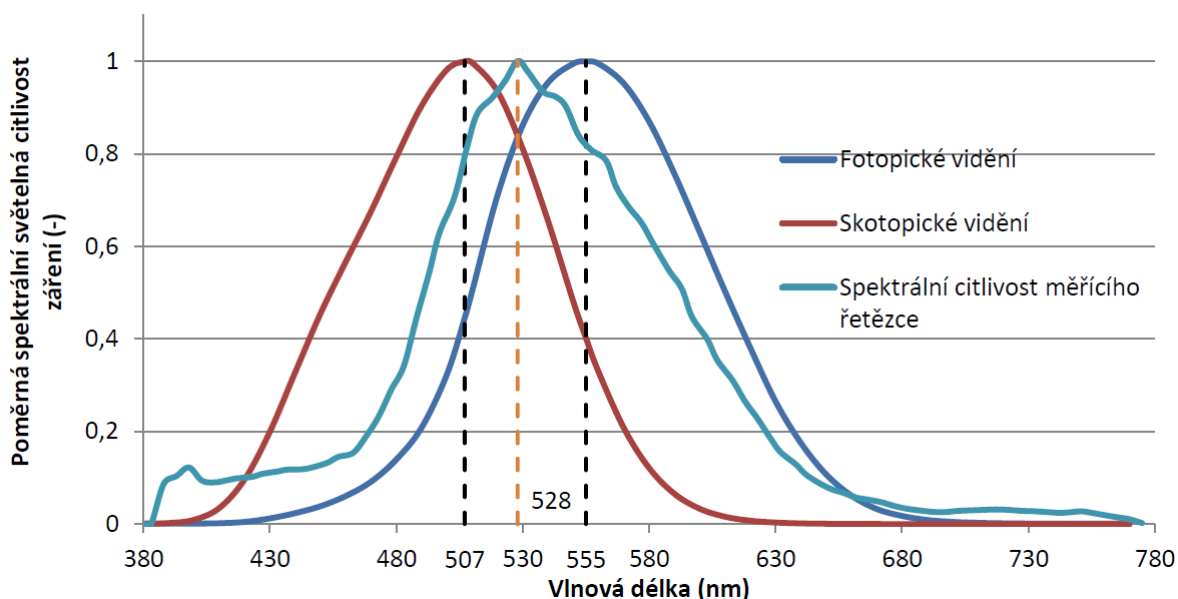
Na obr.16. je fotka filtrového kola uloženého v kameře G2-4000 CCD, čísla určují pořadí filtrů.

Pro potřeby měření bylo třeba vytvořit speciální optický filtr, který by odpovídal mezopické fotometrii. Jeho spektrální charakteristika je vyznačena na Obr.17. zeleně. Filtr byl vyroben na FEKT VUT v Brně a následně byla vytvořena již zmíněná charakteristika. Charakteristika byla změřena pomocí světelného zdroje OL490. (4)



Obr.17. Charakteristiky spektrálních světelných citlivostí senzoru a optického filtru (4)

Součtem těchto dvou charakteristik vznikla výsledná světelná citlivost měřícího řetězce. Tato výsledná charakteristika je znázorněna na dalším obrázku Obr.18. spolu se skotopickou a fotopickou spektrální světelnou citlivostí. Průběh dosahuje maxima v 528 nm, což odpovídá spektrální charakteristice mezopického vidění s koeficientem  $m = 0,7$ .



Obr.18. Průběhy spektrální citlivosti (4)

## 5.4 Rameno Celestron Nexstar

Pohyblivé rameno Celestron Nexstar 8 je dodáváno v kompletu s tubusem na pozorování hvězd a nastavitelným tripodem s vlastní vodováhou. Pro měření tubus nebyl k dispozici a proto v této práci nebude nijak rozebírán. Hlavní otočná část obsahuje odnímatelný ovladač pro ruční ovládání ramena. Pohyb je realizován ve dvou osách, kdy v základně je uložen servomotor pro otáčení v horizontálním směru a na vrcholu hlavy další servomotor pro pohyb ve vertikálním směru. Kombinací těchto dvou pohybů lze docílit natočení do libovolného směru. Tubus se vkládá do vrcholu hlavy do instalovaného svěráku. V našem případě byla použita kamera připevněná na nástavci, viz. Kapitola 6. (15)



*Obr.19. Soustava tripod a otočná hlava*

Zacílení kamery lze provést několika způsoby:

- Two star alignment, neboli zacílení pomocí dvou hvězd.
- Auto two star alignment, méně přesná, ale mnohem jednodušší varianta
- Third star alignment, neboli zacílení pomocí třetí hvězdy, nejpresnější možnost

## **Zacílení pomocí auto two star alignment**

Nejvhodnější možnost pro méně zkušené uživatele s omezenou znalostí noční oblohy, také mnou zvolená možnost při realizaci. Její výhoda spočívá v tom, že stačí najít pouze výchozí polohu na sever, zadat potřebné údaje a automat se pak postará o samotné zacílení. Není třeba znát konkrétní hvězdy ani souhvězdí, metoda ale není vhodná pro dlouhé pozorování, například v rámci hodin.

- Jakmile je přístroj sestaven a zapojen do napájení, stlačením Enter na ovladači začne zaměřování.
- Pomocí šipek nahoru / dolů se zvolí možnost auto-align a potvrdí se stlačením Enter.
- Na displeji se objeví instrukce vycentrovat rameno na sever, toho lze docílit nalezením Polaris (Severky), nebo pomocí kompasu. Samotný pohyb je pak vykonán pomocí ovládacích prvků na ovladači.
- Následuje instrukce zadat doplňující informace, ty jsou:
  - o Date, datum ve formátu měsíc / den / rok.
  - o Time, čas, ve formátech 12h / 24h, při zvolení 12h je třeba upřesnit am / pm.
  - o Timezone, výběr časového pásma v místě měření.
  - o Longitude, zeměpisná délka
  - o Latitude, zeměpisná šířka

Po splnění těchto kroků rameno samo zacílí na vhodný objekt z databáze, po ukončení pohybu je uživatel vyzván aby provedl závěrečnou korekci, k tomu je třeba tubus, nebo „star pointer finder“. Pomocí ovladače se potom přesně zacentruje na dříve zvolenou hvězdu. Procedura se pak musí zopakovat pro druhou hvězdu zvolenou z databáze. Potom co je i druhá hvězda vycentrovaná na střed zorného pole, stačí jen potvrdit a rameno už bude samo sledovat oblohu. Po zacentrování už lze s ramenem otáčet do libovolných směrů a sledování oblohy to nijak neovlivní.

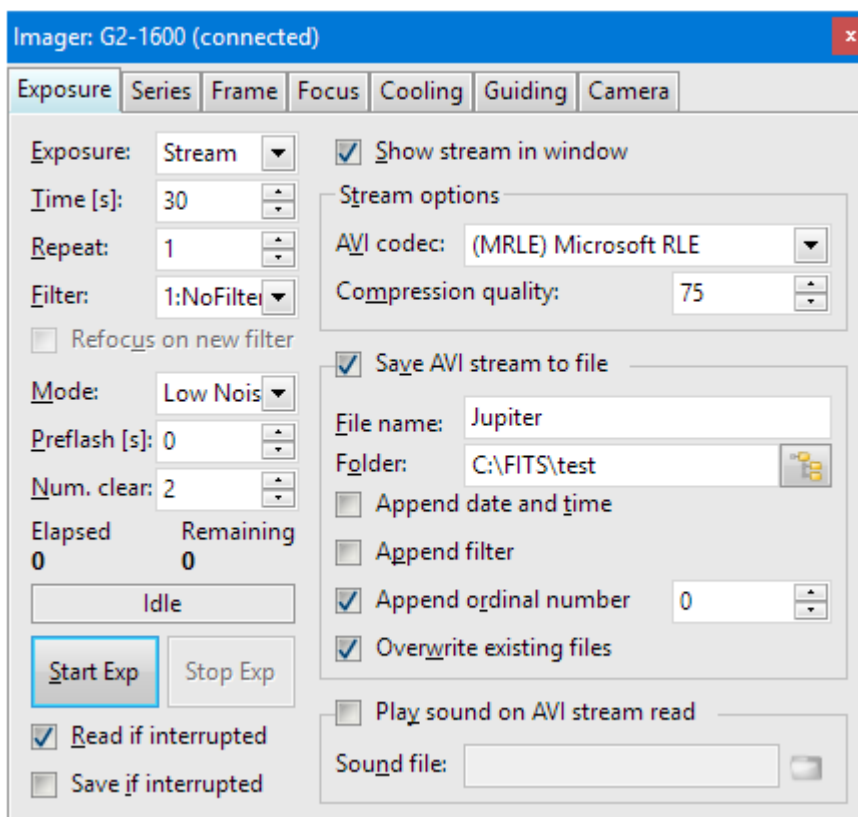
## **Možnosti sledování**

- Alt – Az - základní přednastavený režim sledování, pro režim kdy je rameno postaveno na rovné podložce nebo na tripodu bez „rovníkového klínu“. Teleskop musí být zacílen pomocí metody dvou hvězd pro správnou funkci v tomto režimu.
- EQ north - Sledování oblohy za použití „rovníkového klínu“ a zacentrování na sever pro použití v severní hemisféře.
- EQ south - Sledování oblohy za použití „rovníkového klínu“ a zacentrování na sever pro použití v jižní hemisféře.



## 5.5 SIPS

SIPS – Scientific Image Processing Systém. Program pro ovládání kamery G2-4000 CCD přímo doporučený výrobcem. Pro měření byla použita nejnovější verze k datu vytvoření této práce a to verze 3.7.3, 64bit. Program byl vytvořen firmou Moravian Instruments, Inc. V programu lze plně ovládat hlavní kameru a zároveň připojit pointační kameru pro přesné sledování oblohy. Pro realizované měření ale pointační kamera nebyla k dispozici. (16)

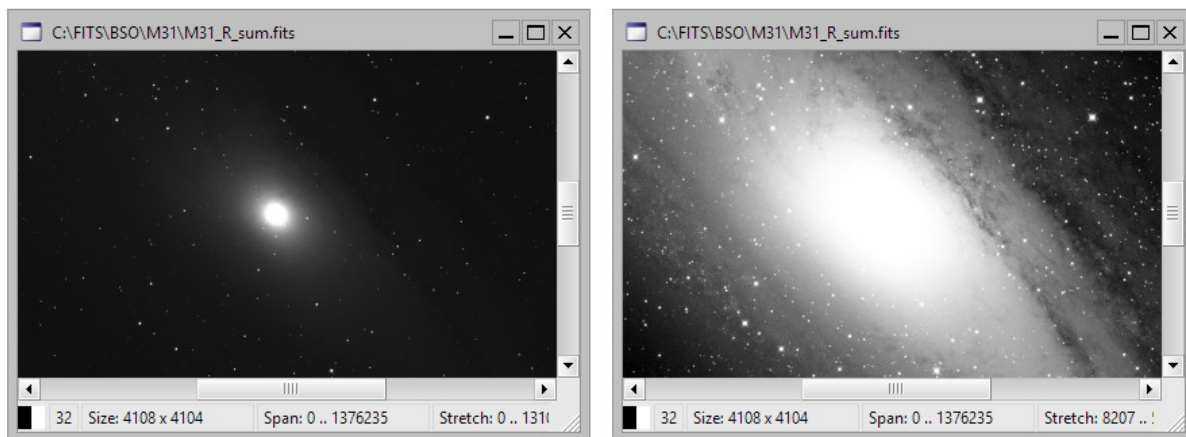


Obr.20.Ovládací rozhraní programu SIPS (16)

Hlavní funkce mimo jiné jsou:

- Ovládání kamery
- Pořizování expozic, včetně nastavení filtru, délky expozice, místo uložení atd.
- Úprava pořízených expozic včetně jasových map, využití histogramu atd.
- Možnost slučování separovaných R, G a B snímků pro získání barevných fotek
- Kalibrace expozic pomocí dark a flat fotek, které odstraňují vlivy temného proudu a oslnění
- Ovládání chlazení kamery





*Obr. 21. jedna fotka M31 galaxie po a před úpravou (16)*

Na Obr.20. je znázorněna fotka galaxie M31 po úpravě (vlevo) a před úpravou (vpravo). K úpravě plně stačí program SIPS, kde se pomocí histogramu vybere konkrétní jasové pásmo pro zvýraznění žádaných detailů. Po odečtení dark a flat snímků dosáhneme čistého snímku bez vad, takto upravené snímky ale ztrácejí svoji výpovědní hodnotu z vědeckého hlediska, proto takové úpravy slouží spíše pro rekreační použití.

SIPS ukládá data pouze ve formátu .FITS, to podstatně ztěžuje spolupráci s programem LumiDISP. Více v kapitole 6. Pro uložení do jiných formátů je třeba exportovat soubory, SIPS umožňuje export do 8 i 16 bitových formátů. Dostupné formáty jsou .bmp, .jpg, .jpeg, .png, .TIFF. Takto exportované snímky ale podléhají kompresi a ztrácejí podstatnou část ze svých metadat. Pro konkrétní použití je hlavní nevýhoda jasového kanálu, který je třeba následně simulovat kalibrační rovnicí.

## 5.6 LumiDISP

LumiDISP, neboli Luminance DIStribution Processing. Program stvořený pro hloubkovou jasovou analýzu na VUT Brno doc. Ing. Petrem Baxantem Ph.D. Pro měření byla použita verze 1.2.0.20 z roku 2006, poměrně ranná verze s omezeným použitím. LumiDISP slouží pro analýzu jasových poměrů na základě vyhodnocení obrazových dat z digitální fotografie. Primárně slouží jako postprocessingový nástroj pro osvětlovací techniku zjednodušující měření a vyhodnocení jasu, respektive jasových poměrů. Jednotlivé kroky při práci s LumiDISPem:

- Vybrat správnou akalibrační databázi
- Založení nového projektu nebo otevření existujícího
- Vytvoření nového záznamu v databázi
- Vyplnění všech potřebných dat, vždy je třeba alespoň jeden pohled view
- Přidání fotografie
- Vypočtení jasového kanálu pomocí funkce
- Přidání výsledků do databáze (17)

Program v této podobě neumožňuje zavedení rastru a tím pádem ani přesné odečtení jasové mapy, informaci o vypočteném jasovém kanálu tedy získáváme buď kurzorem, nebo z ručně vložené přímkou / výseče. Program je ale pod stálým vývojem a možnosti vyhodnocování se rapidně zlepšily, proto doporučuji použít aktuální verzi.

LumiDISP je prodáván v sadě s vybavením plně kompatibilním se software. Obsahuje fotoaparát NIKON D7200 s technickými specifikacemi:

Počet zobrazovaných bodů	- 24,2 milionů
Typ snímače	- CMOS Nikon DX 23,5 x 15,6
Velikost obrazu:	- large 6000 x 4000 - medium 4496 x 3000 - small 2992 x 2000
Operační systém	- Windows 7 / 8 / 10
Dynamický rozsah měření jasu	- 1 : 1000 na jedno měření
Úplný rozsah měření jasu pro F = 18 mm (bez filtru	1 : 3 200 000 000 (18)

## 6 Měření a vyhodnocení jasů noční oblohy

Měření bylo prováděno v obci Horní Bludovice u Ostravy. Souřadnice  $49^{\circ}45'02.8''$  severně a  $18^{\circ}26'23.5''$  východně. Měření probíhalo v noci ze 14.4. na 15.4., noc byla bezoblačná a bez viditelného měsíce. I přes poměrně odlehlou lokalitu a odstínění většiny veřejného osvětlení bylo rušivé světlo na horizontu značné.

Při sestavování měřicího stanoviště vzniklo několik problémů, za prvé kamera G2-4000 CCD není navržena tak, aby byla kompatibilní s ramenem Celestron Nexstar, proto bylo třeba udělat mírné polní úpravy. Za druhé bylo třeba vhodně zvolit polohu měřicího stanoviště, vzhledem k tomu, že optika rybí oko zabírá i horizont, je žádoucí, aby obsluhující počítač i samotná obsluha byla v zákrytu a nepoškozovala tak kvalitu snímku svým pohybem, popřípadě jasnem z monitoru. Dále je třeba zajistit napájení obsluhujícího počítače, ramena Nexstar a samotné kamery, tohle všechno značně omezuje pole působnosti.



*Obr.22. boční snímek upravené soustavy kamera - rameno*



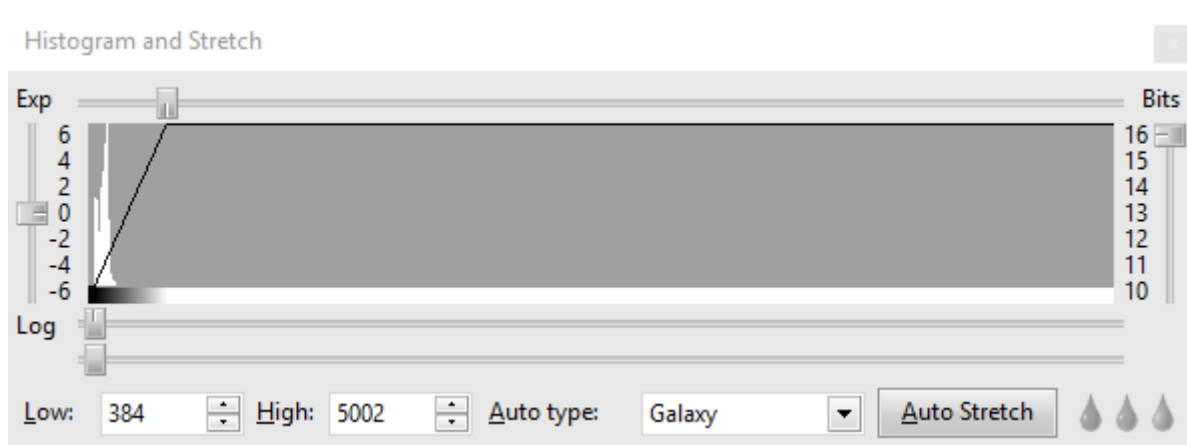
*Obr.23. Pohled seshora upravené soustavy kamera – rameno*

Jak je patrné z obrázků 22 a 23, bylo třeba upravit uchycení kamery. Rameno Celestron Nexstar obsahuje integrovaný svěrák na vrcholu hlavy pro upevnění tubusu nebo dalekohledu. Kamera je však příliš široká, než aby šla upevnit, a proto jsem musel použít nástavec, který se upevnil do svěráku. Kamera se k nástavci upevnila šroubem do vnějšího pláště kamery, po délce spoje oboustrannou lepící páskou zajištěná proti otáčení, a nakonec zafixovaná černou lepící páskou jako pojistka. Takto připevněná kamera značně posouvá těžiště a tím pádem servomotor zajišťující vertikální pohyb nebyl schopný kameru udržet. Proto bylo přidáno závaží na druhý konec nástavce pro vyrovnání těžiště. Takto upravená soustava kamera – rameno byla odnesena na měřicí stanoviště a začalo samotné měření.

Po zaostření objektivu rybího oka bylo pořízeno několik statických fotek s krátkou expozicí s následujícími dalšími měřeními s rostoucí délkou expozice. Měření prokázalo, že za daných podmínek je nejvhodnější krátká expozice 10 sekund. Nejenže snímek není tolik postihnut šumem CCD čipu, ale nevyskytují se „protáhlé“ hvězdy na obloze, ani rozmazané objekty na horizontu. Jako použitelné maximum za daných podmínek je měření o délce 10 minut, při delších expozicích dochází k saturaci a snímky se stávají nepoužitelnými.



*Obr.24. Statický obraz s délkou expozice 10s*



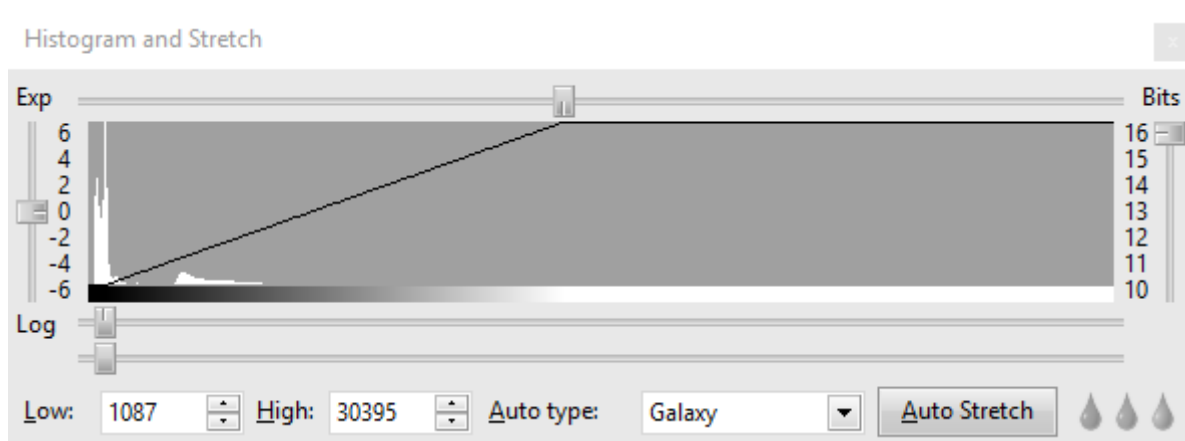
*Obr.25. Histogram statického obrazu s délkou expozice 10s*



Snímek Obr.24. obsahuje statický obraz bez zapnutého ramene Nexstar. Ze snímku je patrné, že i přes poměrně odlehlou lokalitu bylo rušivé světlo poměrně značné, a to i přes zaostření objektivu na užší úhel, to znamená že skutečný horizont na snímku ani není. Ve spodní části expozici narušuje blízký dům a jeho svit z oken, tomuto narušení se ale nelze vyhnout, protože musí být zajištěno kontinuální napájení počítače, kamery i ramena. V levé části snímku se nachází veřejné osvětlení, které dále narušuje měření.

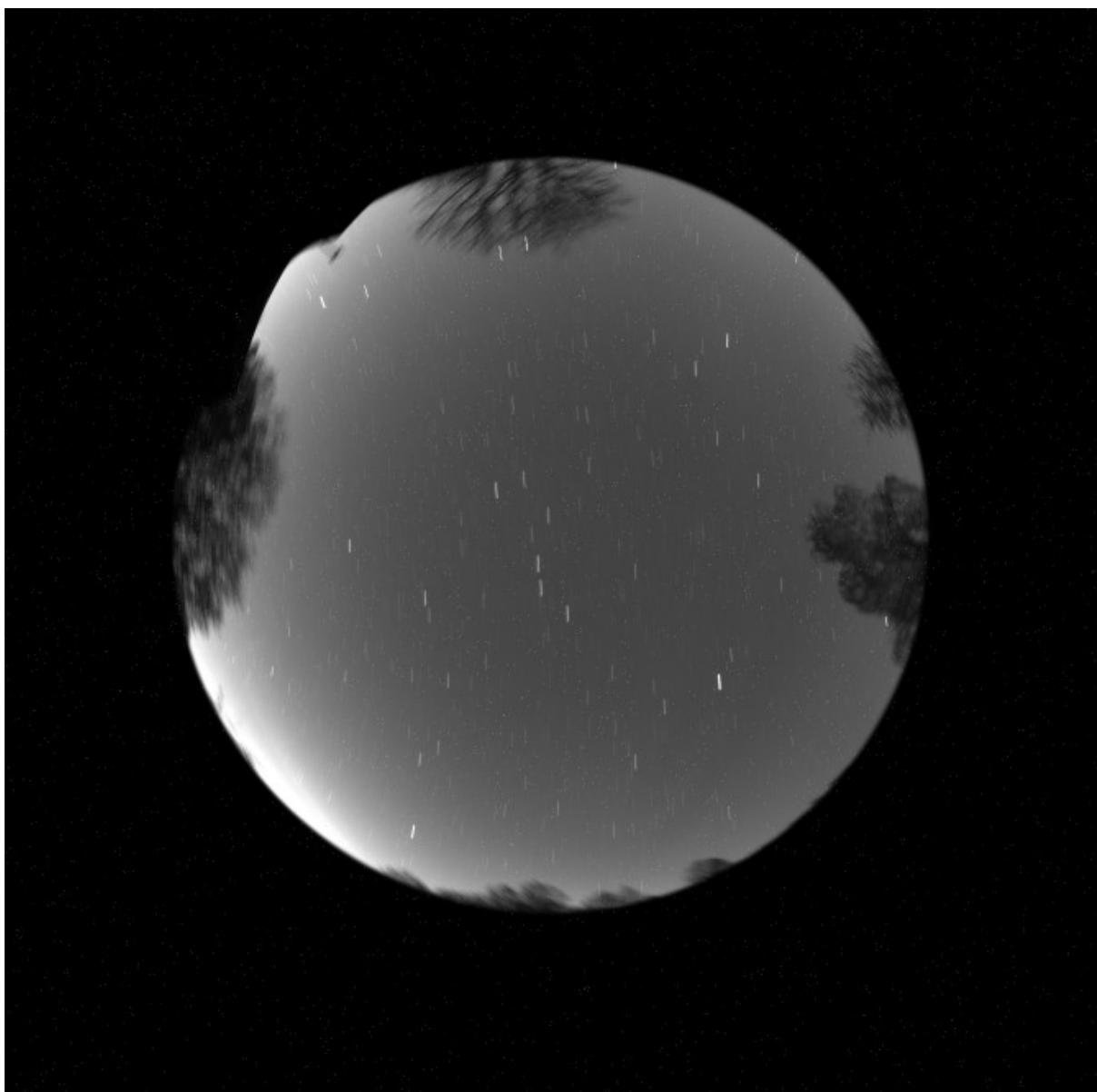


*Obr.26. Pohyb kompenzovaný ramenem s délkou expozice 8 minut*

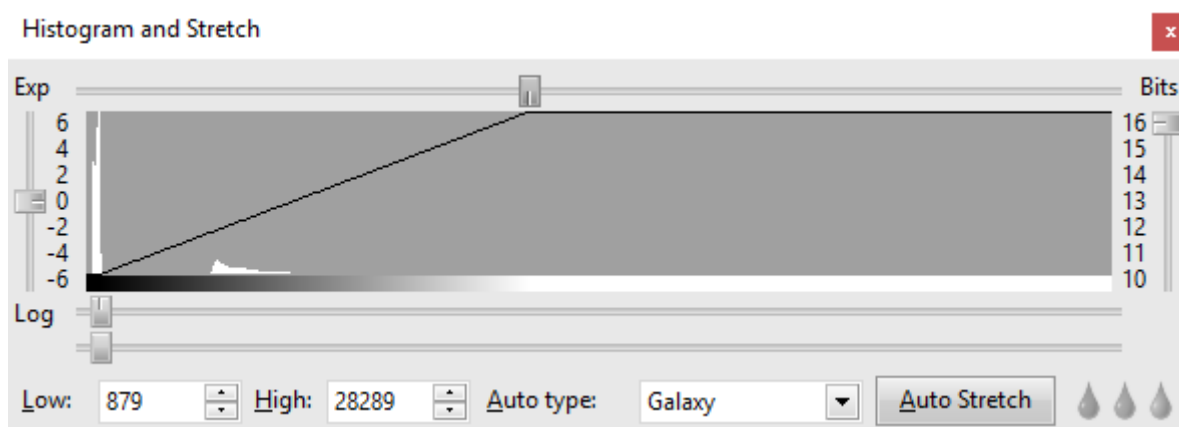


Obr.27. Histogram snímku s pohybem kompenzovaným ramenem s délkou expozice 8 minut

Snímek Obr.26. byl pořízen s ramenem zacíleným pomocí auto two star align. Vznikl jeden z hlavních problémů špatné kvality fotek. Pro přesné zacílení ramene je třeba přesně vycentrovat dvě různé hvězdy. To je se současnou sestavou v podstatě nemožné. Je třeba zacílení provést s dalekohledem, nebo s kamerou která dokáže přenášet okamžitý obraz, centrování metodou zkoušení několika vteřinových expozic a následné jemné upravování náklonu je v podstatě nemožné. Metoda byla ale přesto demonstrována, protože i přes svoji polovičitost je prokazatelně funguje. Hvězdy po noční obloze v podstatě „rotují“, na pořízeném snímku je ale však vidět jen vertikální pohyb. To znamená, že zacílení na sever pomocí kompasu bylo přesné a jen pohyb v druhé ose je mimo synchronizaci, to bylo způsobeno právě nemožností přesného zacílení na hvězdu. Automatický pohyb ramene sice umožňuje nastavení polohy z databáze, ale stále potřebuje upřesnění. Z histogramu je pak patrné, že největší podíl má úplně vlevo veřejné osvětlení a až pak na mnohem nižší hladině samotný jas oblohy.



Obr.28. Pohyb kompenzovaný ramenem s korekcí směru, 10 minut



Obr.29. Histogram fotky pohyb kompenzovaný ramenem s korekcí směru, 10 minut



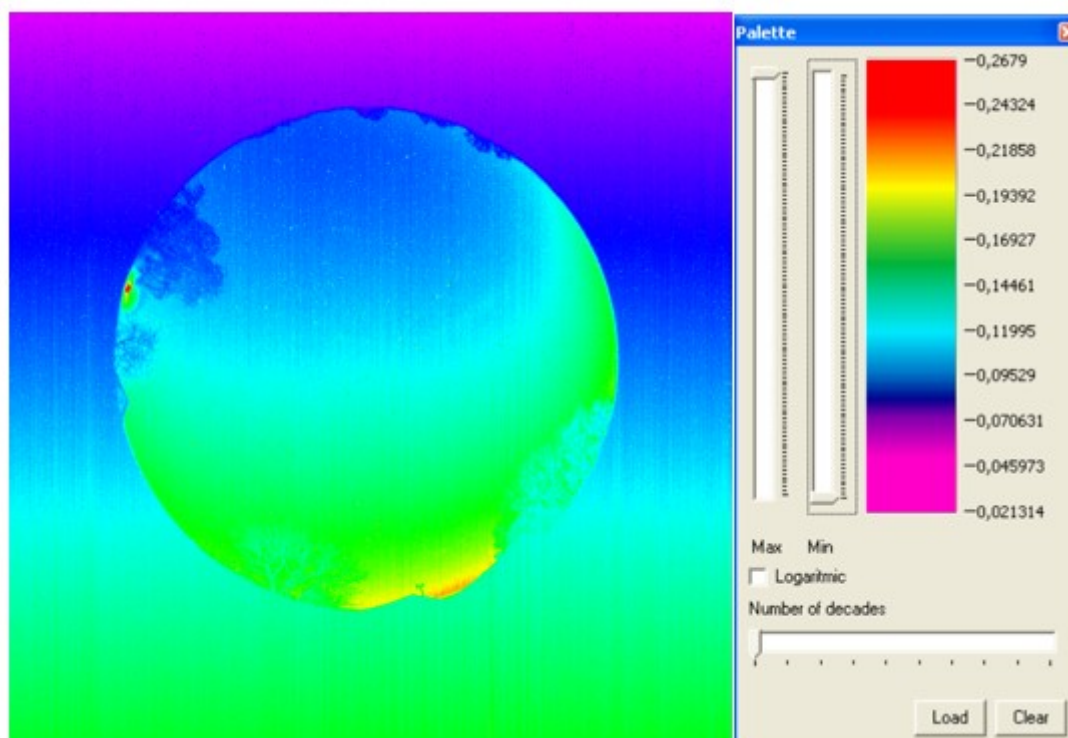
Snímek Obr.28. je téměř totožný s expozicí 8 minut, byla však provedena korekce náklonu kamery po automatickém natočení a to podstatně zlepšilo rozložení rušivého světla na snímku. Histogram je však téměř neovlivněn. Nejdelší měřená expozice byla 13 minut, ale snímek je úplně znehodnocený saturací, kdy je většina snímku úplně bílá.

Pořízené snímky byly následně analyzovány v LumiDISPu. Před samotným vyhodnocením musely snímky projít úpravou. Ovládací program SIPS ukládá snímky ve formátu .FITS, pro použití LumiDISPu bylo třeba provést export do .bmp formátu, při tom ale zanikla většina metadat potřebných k výpočtu, spolu se ztrátou jasového kanálu. Bmp snímky byly nahrány do LumiDISPu a dále vyhodnoceny, vzhledem k tomu že poskytnutá verze neumožňuje tabulkový výstup ani odečítání z rastru je vyhodnocení vesměs orientační, kdy se dá hodnota jasu odečítat jen z kurzoru nebo ručně určených výsečí. Kvůli kompresi je třeba dopočítat zvlášť jasový kanál pomocí kalibrační rovnice.

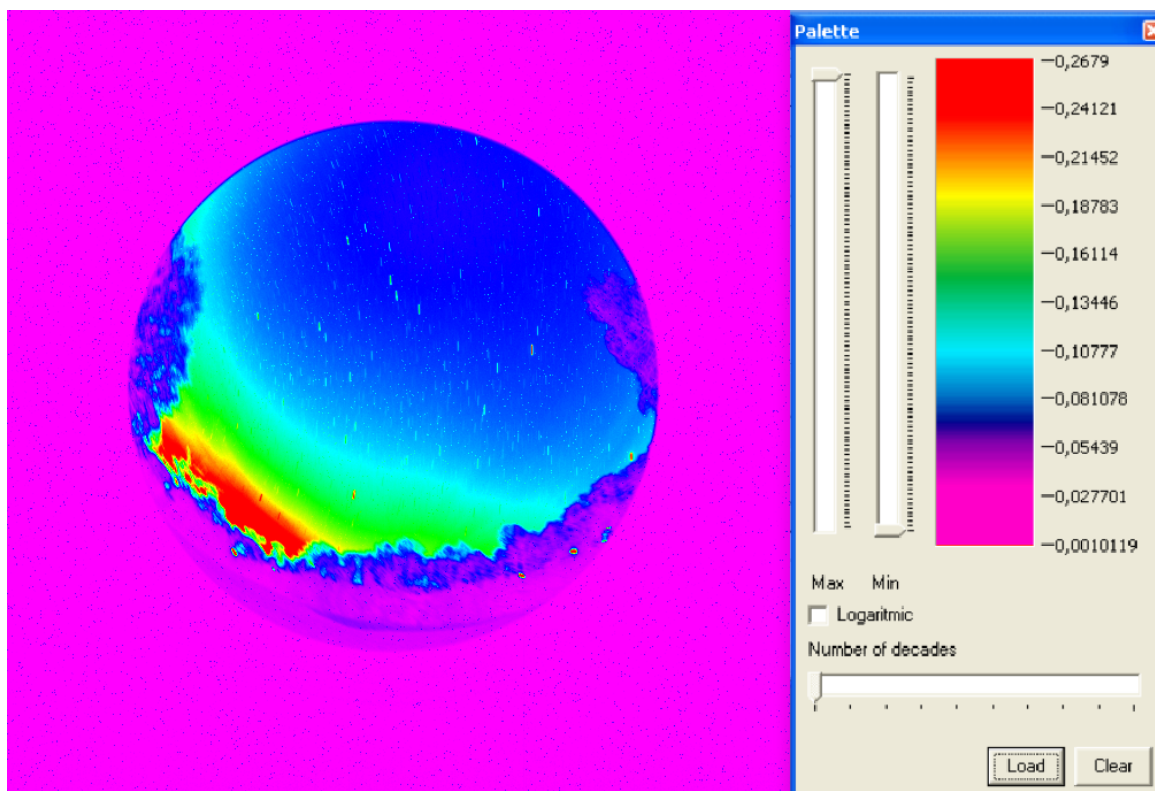
$$L = \frac{Y}{S} \cdot (Y \cdot 1,1 + 8,6) \cdot (1 + e_v) \quad (17)$$

- L - výsledný jas (cd / m<sup>2</sup>)
- Y - vybuzení pixelu ( $0 \leq Y \leq$ ) (-)
- S - hodnota času expozice (s)
- e<sub>v</sub> - průměrná hodnota systematické chyby (-)

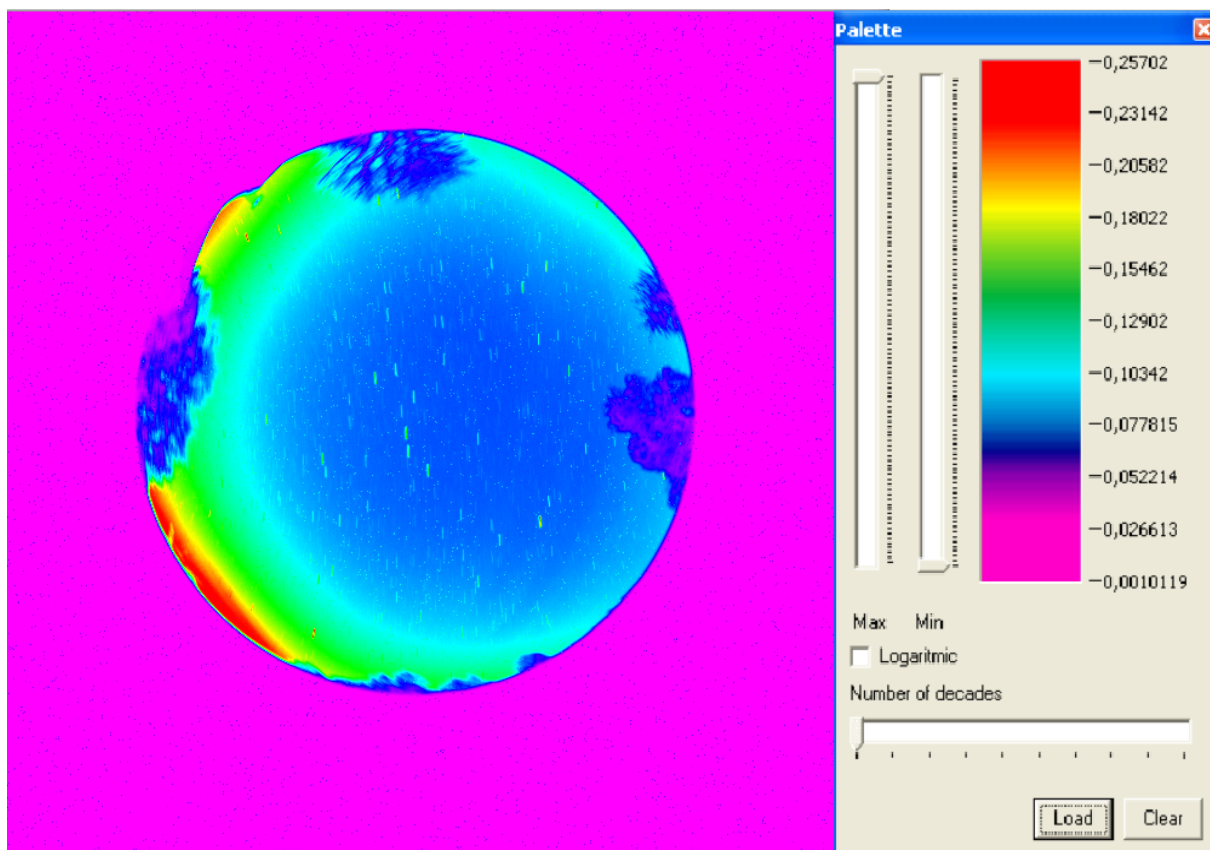
Vybuzení pixelu Y nebylo možno propočítat, protože chyběly data k přenásobení jednotlivých RGB prvků. Pro potřeby měření a rozumnou míru hodnot byla konstanta na přenásobení zvolena jako 0,1, vzhledem k tomu, že v bodě x platí R = G = B, ale  $x \neq y$  je možno použít jen tuto konstantu. Odečtené hodnoty proto neodpovídají realitě, ale alespoň vypovídají o vývoji jasových poměrů na snímku. Pro přesné hodnoty stačí pouze znát konstanty pro výpočet Y.



Obr.30. Jasová mapa 10 sec



Obr.31. Jasová mapa 8 minut



*Obr.32. Jasová mapa 10 minut*

Na obrázcích 30-32 je zřetelné, že při expozici 10 vteřin je původní obraz sice nejkvalitnější, ale v rámci jasové analýzy má nejmenší výpovědní hodnotu. Rozdíly mezi intenzitami jasu jsou minimální, proto nejsou skoro vidět hvězdy. U expozic 8 a 10 minut už je výsledek podstatně lepší, výsledek u obou je téměř totožný, až na náklon kamery u 8 minutové expozice, kde pak jas na horizontu zkreslil část snímku.

## 7 Závěr

V teoretické části je rozebrána problematika rušivého světla, jeho kategorizace, zdroje, dopady na životní prostředí i jeho spotřeba energie. Dále je rozebráno chování zrakového orgánu při mesopickém vidění, způsoby vyhodnocení jasu i rozdělení podle normy. V praktické části jsou pak probrány jednotlivé komponenty měřicího řetězce, následně bylo provedeno samotné měření a vyhodnocení. Realizace navrženého měřicího řetězce poukázala na několik zásadních problémů, které výrazně snižují kvalitu analýzy. Zmíněné problémy jsou způsobeny nekompatibilitou použitých zařízení, většina jde potlačit mechanickou úpravou, ale hlavní problém spočívá v nekompatibilitě software. Snímky byly pořizovány programem SIPS, programem, který byl vytvořen stejnou firmou, co vyráběla kameru. Tento program dokáže ukládat snímky pouze ve formátu .FITS, tento formát ale LumiDISP není schopen rozeznat. Provedl se proto export do formátu .bmp, formátu který nabízel nejcitlivější kompresi. Po kompresi došlo ke ztrátě jasového kanálu a většiny metadat. Tato ztráta výrazně ovlivňuje kvalitu provedené analýzy. Proto doporučuji použít kompatibilní software, například ovládání kamery, které je schopno pořizovat snímky ve formátu .RAW, nebo vyhodnocovací software, který je schopen pracovat s formátem .FITS. Dále doporučuji použít aktuální verzi LumiDISPu, pro práci byla dostupná verze 1.2.0.20 z roku 2006, která poskytovala jen velmi omezené možnosti vyhodnocování, a hlavně neobsahovala možnost exportu do tabulek ani použití rastru. Pro vyhodnocení rušivého světla doporučuji použít focení bez pohyblivého ramena, tím se sice bude pohybovat obloha, ale záření z horizontu bude statické a vhodné pro vyhodnocení. Pro pozorování noční oblohy je naopak vhodné rameno ponechat, ale vyměnit optiku rybí oko za užší objektiv, nejenže se podstatně zjednoduší zacílení ramena, ale také pořízené snímky nebudou tolik ovlivněny rušivým světlem z horizontu. Tím nedejde tak brzo k saturaci a bude možné použít delší expozice s kvalitnějším výstupem. Pořízené snímky demonstrují metodiku měření, díky ztrátě metadat nebylo možné přesně propočítat kalibraci a tím pádem jsou číselné výstupy jasu spíše orientační. Za použití kompatibilního software tento problém ale odpadá a bude možné odečítat přesné hodnoty, za použití novějšího software i zanesení rastru a analyzování snímku po jednotlivých stupních.

## 8 Literatura

- (1) Jasové pomery na noční obloze - Prof. Ing. Karel Sokanský, CSc.
- (2) Light pollution handbook
- (3) Oko (biofyzika) (online) (cit 28.4.2018) dostupné z [https://www.wikiskripta.eu/w/Oko\\_\(biofyzika\)](https://www.wikiskripta.eu/w/Oko_(biofyzika))
- (4) Ing. Závada, Petr. Disertační práce, Návrh metodiky vyhodnocení jasů v oblastech mezopického a skotopického vidění.
- (5) Bc. Čmiel, Josef. Diplomová práce, Parametry veřejného osvětlení v mezopické oblasti
- (6) Lightning and safe driving (online) (cit 28.4.2018) Dostupné z <https://www.arrivealive.co.za/Lighting-and-Safe-Driving>
- (7) Jasová mapa (online) (28.4.2018) dostupné z <https://josefstepanek.cz/wp-content/uploads/2009/06/obr.jpeg>
- (8) Osvětlení komunikace (online) (28.4.2018) dostupné z <http://docplayer.cz/docs-images/24/3848399/images/37-0.jpg>
- (9) Hygienické aspekty rušivého světla (online) (28.4.2018) dostupné z <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/hygienicke-aspekty-rusiveho-svetla-v-komunalnim-prostredi--601>
- (10) Nákres ULR (online) (cit 28.4.2018) dostupné z [https://www.espace-sciences.org/sites/espace-sciences.org/files/archive/images/photos/0005/img\\_1169545420525.jpg](https://www.espace-sciences.org/sites/espace-sciences.org/files/archive/images/photos/0005/img_1169545420525.jpg)
- (11) Nákres světelného přesahu (online) (cit 28.4.2018) dostupné z [http://www.joondalup.wa.gov.au/Libraries/Bus\\_Forum\\_Knowledge\\_City/Obtrusive\\_Lighting/Images.sflb.ashx](http://www.joondalup.wa.gov.au/Libraries/Bus_Forum_Knowledge_City/Obtrusive_Lighting/Images.sflb.ashx)
- (12) Světlo a osvětlení – Osvětlení pracovních prostorů – Část 2: Venkovní pracovní prostory Norma překlad EN 12464-2
- (13) G2 CCD uživatelská příručka
- (14) Rybí oko Nikon (online) (cit 28.4.2018) dostupné z <https://www.oehling.cz/meike-8mm-f35-fisheye-cs-nikon>
- (15) nexstar\_8\_manual
- (16) SIPS help file
- (17) LumiDISP help file
- (18) LumiDISP (online) (cit 29.4.2018) dostupné z [http://www.lumidisp.eu/wp-content/uploads/2018/03/LumiDISP\\_LDA\\_overview\\_cz.pdf](http://www.lumidisp.eu/wp-content/uploads/2018/03/LumiDISP_LDA_overview_cz.pdf)